

# **Estudo da aderência e fendilhação em elementos de Betão Incorporando Nanopartículas**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em  
Engenharia Civil – Especialização em Construção Urbana

**Autor**

**Rui Ismael Gomes de Sousa**

**Orientador**

**Prof. Doutor Ricardo Nuno Francisco do Carmo**

Instituto Politécnico de Coimbra  
Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

**Coimbra, Setembro, 2015**



*“Obviamente o dito não se escuta.  
Obviamente o enviado não se sente.  
Obviamente tudo e nada está ligado,  
Ao querer simplificado, obviamente.  
Obviamente que pensar,  
Deixa marcas de desprezo.  
Mas que raio!  
Mentalidades de preguiça  
Ou cerradas em escura claridade.  
Quem pensa, que pensar  
É um ritmo deslavadado,  
Não saberá que o óbvio  
Nem sempre será o tão óbvio,  
Obviamente.”*

*Rui Ismael*



## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro ponto, um agradecimento ao Professor Doutor Ricardo do Carmo, o meu orientador, por todos os conhecimentos que me passou ao longo da realização desta dissertação. A sua capacidade de ajuda, dedicação e amizade em qualquer momento que eu precisasse mostrou ser uma mais-valia. As sugestões que proporcionou tornaram o trabalho realizado com muito mais valor do ponto de vista científico. Foi uma constante aprendizagem e um sentimento de segurança com a sua ajuda. Um muito e sincero obrigado!

Um agradecimento ao Professor Doutor Hugo Costa, pela amizade e disponibilidade que sempre demonstrou para tirar qualquer dúvida que surgisse ao longo do trabalho laboratorial. Com a sua experiência nesta área de estudos, as suas explicações conseguiram transmitir-me novos conhecimentos e experiência.

Ao técnico do Laboratório de Materiais de Construção, Sr. António Amaral, pela disponibilidade para ajudar nos trabalhos laboratoriais, bem como a amizade e boa disposição que sempre o acompanhou ao longo dos trabalhos.

Um cumprimento especial aos meus colegas de laboratório: Cátia Lourenço, Eliana Soldado e João Vitor Silva. Sem a presença destas três pessoas, a construção de todo este trabalho seria completamente diferente. Pelos momentos sérios, pelos momentos de gargalhada e até mesmo pelos momentos de chatice. A aprendizagem que retirei de cada um foi enorme, não só ao nível científico mas também um crescimento como pessoa. A vossa disponibilidade de ajuda foi extremamente grande e essencial. Obrigado por me aturarem ao longo deste ano.

Ao Professor Engenheiro Paulo Maranha, um agradecimento pela ajuda na aquisição de algum material para a concretização dos ensaios laboratoriais.

Um agradecimento ao Departamento de Engenharia Civil, do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra por oferecer as condições necessárias para executar este trabalho. Também ao Departamento de Mecânica, pela ajuda prestada na execução da soldadura dos varões de aço necessários para os ensaios.

Ao meu irmão Gonçalo Sousa e à minha cunhada Cláudia Oliveira, pela convivência ao longo destes anos. Pelo conforto e ajuda na parte mais familiar do dia-a-dia.

Um agradecimento especial aos meus pais, sem eles nada disto poderia ter acontecido. Pelo esforço que sempre fizeram para que eu conseguisse concluir os meus estudos. Pelo apoio que demonstraram nas decisões que sempre tomei. Por estarem sempre lá.

Por fim, um agradecimento a todos aqueles que de uma forma ou outra estiveram comigo ao longo de todo este processo. Sei quem foram e continuarei a saber.

Muito Obrigado a todos!



## RESUMO

Com o crescimento progressivo da preocupação quanto ao consumo energético a nível global e a sua redução, por consequência das alterações climáticas, tem havido uma tentativa de adaptação do setor da construção para dar um contributo neste campo. O betão armado, pelas suas características e pela facilidade com que é moldado, estabeleceu com o Homem uma “amizade” duradoura. Atualmente é o material mais consumido a nível mundial, com uma produção de, aproximadamente,  $10\text{km}^3/\text{ano}$ , prevendo-se que este número venha a aumentar nos próximos anos. A sua produção necessita de um elevado consumo energético, principalmente na produção de um dos seus constituintes, o cimento. Mantendo-se a utilização generalizada do betão, uma potencial solução para este problema passa então pela redução do consumo deste elemento.

Uma alternativa possível e que, nos últimos anos, ganhou relevo, prende-se com a introdução de nanotecnologia na produção do betão. A progressiva substituição do cimento Portland, por outro elemento capaz de fornecer as mesmas características às peças de betão, é uma necessidade, surgindo a introdução de nanopartículas como um caminho possível para esse objetivo.

A alteração da composição do betão com a introdução de nanopartículas, acarreta consigo uma possível alteração do comportamento estrutural de elementos de betão armado, devido às alterações das propriedades do próprio betão. Este trabalho teve como motivação principal o estudo da influência deste “novo” betão na aderência aço-betão. Para a análise deste fenómeno, foram definidas duas etapas de estudo, sendo a primeira a produção de ensaios de arrancamento (*Pull Out*) para medir a tensão de aderência máxima e a segunda a realização de testes em tirantes com o objetivo de medir o padrão de fendilhação nestes elementos. Foram produzidas várias misturas de betão contendo dois tipos de nanopartículas (nano-sílica e nano-alumínio), incorporando também fibras metálicas. O estudo da aderência através do programa experimental apresentado, teve ainda como variáveis o uso de varões lisos e nervurados. No total foram realizados trinta e dois ensaios de arrancamento e dezasseis ensaios de tração com tirantes de betão armado.

Os resultados obtidos demonstraram que a introdução de nanopartículas na composição do betão origina algumas diferenças de comportamento, relativamente ao betão normal. Nalguns casos os resultados foram algo inesperados.

O trabalho desenvolvido no âmbito desta tese estava enquadrado num projeto mais amplo, designado por Nanobetão, promovido por um consórcio estabelecido entre o Instituto Superior de Engenharia de Coimbra e a empresa Smart Inovation.

**Palavras-Chave:** Betão, nanopartículas, nanotecnologias, aderência, fendilhação, tirantes, *Pull Out*, fibras metálicas.





## ABSTRACT

With an increasing concern with energy consumption and its reduction, mainly due to climate changes, there has been an attempt to shape the construction field to favour it. Concrete, for its properties and easy casting, has formed a lasting “friendship” with man. Nowadays, it is the most consumed material resource in the world, with an estimated production of  $10 \text{ km}^3$  per year, which is expected to rise in coming years. Its production demands a high amount of energy, especially when producing its most important component – Portland cement. If the widespread use of concrete stays unchanged, this problem can only be solved by reducing the consumption amount of that element.

A plausible alternative and one which, in the most recent years, has gained some considerable attention, ponders applying nanotechnology to concrete manufacture. The gradual replacement of Portland cement by another element capable of providing the same properties to concrete is necessary. Therefore, the use of nanoparticles is revealed as a possible mean to that end.

The modelling of the concrete composition with the inclusion of nanoparticles entails a viable change on the mechanical behaviour of reinforced concrete elements, due to changes on the properties of concrete itself. This paper main goal was to study the effect of this “new” concrete on the bond between steel and concrete. To study this phenomenon, two stages were outlined: pull out testing – to measure the maximum bond tension – and tie testing – to analyse the cracking pattern. Several admixtures containing two types of nanoparticles (nanosilica and nanoalumina) were produced, and also containing steel fibres. The study of concrete bond, using the presented experimental program, had also the use of round and reinforcing bars as variables. In total, thirty two pull out specimens and sixteen concrete ties were tested.

The obtained results show that the use of nanoparticles in the concrete is responsible for some behavioural changes, when comparing to regular concrete. In some cases, the results were somewhat unexpected.

The developed work on this paper was part of a much wider study, named “*Nanoconcrete*”, promoted by a partnership between Instituto Superior da Engenharia de Coimbra and the firm Smart Inovation.

**Keywords:** concrete, nanoparticles, nanotechnology, bond, cracking, ties, Pull Out, steel fibres.



# ÍNDICE

AGRADECIMENTOS .....	v
RESUMO .....	vii
ABSTRACT .....	ix
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Enquadramento .....	1
1.2 Objetivos.....	3
1.3 Estratégia .....	3
1.4 Organização do trabalho .....	4
2. NANOPARTÍCULAS E FIBRAS METÁLICAS.....	5
2.1 Breve Notas Históricas sobre Nanopartículas .....	5
2.2 Uso de Nanopartículas nos Betões .....	6
2.3 Breve Notas Históricas sobre Fibras .....	8
2.4 Fibras metálicas em Betões .....	9
2.4.1 Resistência mecânica à compressão .....	11
2.4.2 Resistência mecânica à tração .....	11
2.4.3 Resistência mecânica à flexão .....	11
2.4.4 Resistência ao corte .....	11
2.4.5 Fadiga .....	12
2.4.6 Condutibilidade térmica .....	12
2.4.7 Fendilhação por retração .....	12
2.4.8 Durabilidade .....	13
2.4.9 Comportamento ao arrancamento das fibras metálicas .....	13
3. ADERÊNCIA AÇO_BETÃO .....	15
3.1 Definição de aderência betão-aço.....	15
3.2 Aderência em varões de aço lisos e nervurados .....	17
3.3 Diagrama típico do comportamento de varões de aço na aderência.....	17
3.4 Adesão Química .....	18
3.5 Atrito.....	19
3.6 Aderência Mecânica .....	20
3.7 Fatores que influenciam o comportamento da aderência .....	20
3.7.1 Confinamento .....	21
3.7.2 Velocidade e duração das cargas .....	21

3.7.3 Diâmetro do varão.....	21
3.7.4 Características do perfil nervurado .....	21
3.7.5 Resistência do betão.....	22
3.7.6 Cargas repetidas e número de ciclos .....	22
3.7.7 Cedência das armaduras .....	22
3.8 Mecanismo de fendilhação.....	22
3.8.1 Plastificação da armadura .....	26
3.9 Modelos teóricos .....	28
3.9.1 Tension Stiffening Effect .....	28
3.9.2 Eurocódigo 2 .....	28
3.9.3 Model Code 1990.....	31
3.9.4 ACI 224.2R-92.....	32
4. PROGRAMA EXPERIMENTAL .....	35
4.1 Introdução .....	35
4.2 Caracterização dos provetes para os ensaios <i>Pull Out</i> .....	35
4.3 Caracterização dos tirantes de betão armado .....	37
4.4 Caracterização das misturas de betão.....	38
4.5 Materiais.....	39
4.5.1 Betão e seus constituintes .....	39
4.6 Composição das misturas.....	43
4.7 Betonagem .....	45
4.8 Caracterização do betão endurecido .....	46
4.8.1 Resistência à compressão e à tração .....	46
4.8.2 Módulo de elasticidade .....	48
4.8.3 Tensão de flexão residual.....	49
4.9 Configuração geral dos ensaios experimentais .....	50
4.10 Ensaio Pull Out .....	50
4.11 Ensaio Tirantes.....	52
5. ANÁLISE DE RESULTADOS .....	55
5.1 Resultados dos ensaios <i>Pull Out</i> .....	55
5.1.1 Análise força-deslocamento.....	55
5.1.2 Análise tensão-deslocamento .....	57
5.1.3 Análise tensão máxima-resistência do betão ( $f_{cm,cil}$ ) .....	60

---

5.1.4	Análise (tensão residual/tensão máxima) - resistência do betão ( $f_{cm,cil}$ ).....	62
5.2	Resultados dos ensaios de tração dos tirantes .....	64
5.2.1	Análise da relação tensão no aço-deslocamento.....	64
5.2.2	Padrão de fendilhação.....	73
5.2.3	Gráficos de resumo dos ensaios de tirantes .....	79
5.3	Comparação de valores entre os dois ensaios.....	88
5.4	Cálculos teóricos .....	89
6.	CONCLUSÕES .....	97
6.1	Trabalhos Futuros .....	98
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	99

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Esquema da produção e uso do cimento Portland e seus efeitos na emissão de CO <sub>2</sub> .	1
Figura 1.2. Densificação da matriz ligante.	2
Figura 2.1. Imagem comparativa de escalas.	5
Figura 2.2. Preenchimento dos nanoporos pelas nanopartículas.	6
Figura 2.3. Evolução do uso de filamentos no interior de amassaduras na história.	9
Figura 2.4. Exemplos de fibras: a) Fibra com amarração em gancho; b) Fibra com extremidade reduzida; c) Fibra com extremidade alargada; d) Fibra ondulada. (adaptado de Ulrix, E. (2011)).	10
Figura 2.5. Esquematização do fluxo das tensões no betão. a) sem fibras metálicas; b) com fibras metálicas (Adaptado de Vitt, 2011).	12
Figura 2.6. Processo de arrancamento de fibras metálicas em forma de ganchos. a) força aplicada; b) arrancamento por rotura do betão sem deformação da fibra; c) arrancamento por deformação do gancho. (Adaptado de Fernandes, 2012).	13
Figura 3.1. Diagrama do comportamento de aderência dos varões lisos e nervurados (adaptado de Leonhardt e Monning, 1977).	18
Figura 3.2. Ligação química entre os átomos de betão e do aço.	19
Figura 3.3. Rugosidade e atrito entre as duas superfícies em contato.	19
Figura 3.4. Aderência mecânica através das nervuras do varão.	20
Figura 3.5. Comportamento de um tirante de betão armado, relativo à fendilhação entre os estados I e II (adaptado de Vieira, 2011).	23
Figura 3.6. Distribuição das tensões dentro do betão armado no estado I (adaptação Marchão, 2007).	24
Figura 3.7. Distribuição das tensões dentro do betão armado depois da fendilhação (adaptação Marchão, 2007).	25
Figura 3.8. Diagramas de tensão- extensão do aço e do betão durante a fendilhação (adaptação Marchão, 2007).	26
Figura 3.9. Gráficos tensão- deslocamento para a) Plastificação de armadura, b) Fendilhação normal (adaptação Vieira, 2011).	26
Figura 3.10. Contributo do betão entre fendas (adaptação Bento, 2013).	28
Figura 4.1. Material usado para ensaios <i>Pull Out</i> : a) Cilindro metálico (cofragem); b) varão nervurado; c) Varão liso.	35
Figura 4.2. Estrutura de montagem do ensaio <i>Pull Out</i> para betonagem: a) projeto 3D da estrutura com os seus elementos; b) Projeto 3D da estrutura montada; c) Estrutura real em utilização.	36
Figura 4.3. Esquema sobre as dimensões e os elementos constituintes do provete para ensaio <i>Pull Out</i> .	37
Figura 4.4. Material usado e cofragem para ensaios tirantes. a) Varão nervurado; b) Cofragem; c) Varão liso.	37

Figura 4.5. Esquema sobre as dimensões e os elementos constituintes do provete para o ensaio de tirante. ....	38
Figura 4.6. Ligantes e adições usadas: a) Cimento Portland; b) Fíler Calcário. ....	39
Figura 4.7. Imagens CEM das nanopartículas: a) Nanopartícula de sílica (nano-SiO <sub>2</sub> ); b) Nanopartícula de alumínio (nano-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) (cedidas pela empresa Smart Inovation, 2015). ....	40
Figura 4.8. Material líquido usado na mistura: a) Adjuvante; b) Água. ....	41
Figura 4.9. Agregados leves: a) Areia fina 0/1 mm; b) Areia média 0/4mm. ....	41
Figura 4.10. Agregados grossos: a) Areão 4/8mm; b) Brita calcária 6/14mm. ....	42
Figura 4.11. Tipo de varões usados: a) Varão nervurado $\phi 10$ ; b) Varão liso $\phi 10$ . ....	42
Figura 4.12. Fibras DRAMIX RL 45/30 BN : a) Fibras metálicas; b) Pormenor curvatura da ancoragem da fibra. ....	43
Figura 4.13. Sequência de momentos da betonagem: a) Pesagem dos materiais; b) Misturadora em funcionamento; c) Enchimento provetes <i>Pull Out</i> ; d) Enchimento provetes tirantes. ....	46
Figura 4.14. Ensaio de compressão diametral: a) Pormenor provete durante o ensaio; b) Provete após o ensaio. ....	47
Figura 4.15. Ensaio de compressão em cubos de betão. ....	47
Figura 4.16. Ensaio de determinação do módulo de elasticidade: a) Provete na prensa; b) Medição da extensão com o alôngametro. ....	48
Figura 4.17. Ensaio de tensão de flexão residual. a) Carregamento do provete; b) Pormenor da rutura do provete. ....	49
Figura 4.18. “ <i>Setup</i> ” de ensaio experimental: a) Central hidráulica e computação para o registo de dados; b) Pormenor do atuador de carga. ....	50
Figura 4.19. Esquema do ensaio <i>Pull Out</i> . a) Corte do pórtico do ensaio <i>Pull Out</i> ; b) Representação 3D do pórtico do ensaio. ....	51
Figura 4.20. Ensaio <i>Pull Out</i> em execução. ....	51
Figura 4.21. Esquema do ensaio tirante: a) Corte do pórtico do ensaio tirante; b) Representação 3D do pórtico de ensaio. ....	52
Figura 4.22. Ensaio tirante em execução: a) Perspetiva geral do ensaio; b) Pormenor LVDT's; c) Leitura da largura de fendas. ....	53
Figura 5.1. Designação para os provetes estudados. ....	55
Figura 5.2. Relação força-deslocamento para varões lisos. ....	56
Figura 5.3. Relação força-deslocamento para varões nervurados. ....	56
Figura 5.4. Relação tensão-deslocamento para varões lisos. ....	58
Figura 5.5. Relação tensão-deslocamento para varões nervurados. ....	58
Figura 5.6. Valores da tensão máxima de aderência em todos os provetes. ....	60
Figura 5.7. Gráfico relação $\tau_{\text{máx}}$ e resistência betão para varões lisos. ....	61
Figura 5.8. Gráfico relação $\tau_{\text{máx}}$ e resistência betão para varões nervurados. ....	61
Figura 5.9. Gráfico relação $(\tau_{\text{res}} / \tau_{\text{máx}})$ e resistência betão à compressão ( $f_{\text{cm,cil}}$ ), para varões lisos. ....	62
Figura 5.10. Gráfico relação $(\tau_{\text{res}} / \tau_{\text{máx}})$ e resistência betão à compressão ( $f_{\text{cm,cil}}$ ), para varões nervurados. ....	63

Figura 5.11. Relação tensão no aço – deslocamento do tirante T1L_550 e registos da largura das fendas ( <i>w em mm</i> ) ao longo do ensaio. ....	64
Figura 5.12. Relação tensão no aço – deslocamento do tirante T2L_550Al2% e registos da largura das fendas ( <i>w em mm</i> ) ao longo do ensaio. ....	65
Figura 5.13. Relação tensão no aço – deslocamento do tirante T3L_550Si2% e registos da largura das fendas ( <i>w em mm</i> ) ao longo do ensaio. ....	65
Figura 5.14. Relação tensão no aço – deslocamento do tirante T4L_550F0,5 e registos da largura das fendas ( <i>w em mm</i> ) ao longo do ensaio. ....	65
Figura 5.15. Relação tensão no aço – deslocamento do tirante T5L_550F0,5Al2% e registos da largura das fendas ( <i>w em mm</i> ) ao longo do ensaio. ....	66
Figura 5.16. Relação tensão no aço – deslocamento do tirante T6L_350 e registos da largura das fendas ( <i>w em mm</i> ) ao longo do ensaio. ....	67
Figura 5.17. Relação tensão no aço – deslocamento do tirante T7L_350Al2% e registos da largura das fendas ( <i>w em mm</i> ) ao longo do ensaio. ....	67
Figura 5.18. Relação tensão no aço – deslocamento do tirante T8L_350Si2% e registos da largura das fendas ( <i>w em mm</i> ) ao longo do ensaio. ....	68
Figura 5.19. Relação tensão no aço – deslocamento do tirante T1N_550 e registos da largura das fendas ( <i>w em mm</i> ) ao longo do ensaio. ....	69
Figura 5.20. Relação tensão no aço – deslocamento do tirante T2N_550Al2% e registos da largura das fendas ( <i>w em mm</i> ) ao longo do ensaio. ....	69
Figura 5.21. Relação tensão no aço – deslocamento do tirante T3N_550Si2% e registos da largura das fendas ( <i>w em mm</i> ) ao longo do ensaio. ....	69
Figura 5.22. Relação tensão no aço – deslocamento do tirante T4N_550F0,5 e registos da largura das fendas ( <i>w e mm</i> ) ao longo do ensaio. ....	70
Figura 5.23. Relação tensão no aço – deslocamento do tirante T5N_550F0,5Al2% e registos da largura das fendas ( <i>w em mm</i> ) ao longo do ensaio. ....	70
Figura 5.24. Relação tensão no aço – deslocamento do tirante T6N_350 e registos da largura das fendas ( <i>w em mm</i> ) ao longo do ensaio. ....	71
Figura 5.25. Relação tensão no aço – deslocamento do tirante T7N_350Al2% e registos da largura das fendas ( <i>w em mm</i> ) ao longo do ensaio. ....	71
Figura 5.26. Relação tensão do aço – deslocamento do tirante T8N_350Si2% e registos da largura das fendas ( <i>w em mm</i> ) ao longo do ensaio. ....	72
Figura 5.27. Padrão de fendilhação e distância entre fendas ( <i>cm</i> ) nas quatro faces dos provetes T1L_550 e T2L_550Al2%. ....	73
Figura 5.28. Padrão de fendilhação e distância entre fendas ( <i>cm</i> ) nas quatro faces dos provetes T3L_550Si2% e T4L_550F0,5. ....	74
Figura 5.29. Padrão de fendilhação e distância entre fendas ( <i>cm</i> ) nas quatro faces dos provetes T5L_550F0,5Al2% e T6L_350. ....	74
Figura 5.30. Padrão de fendilhação e distância entre fendas ( <i>cm</i> ) nas quatro faces dos provetes T7L_350Al2% e T8L_350Si2%. ....	75
Figura 5.31. Padrão de fendilhação e distância entre fendas ( <i>cm</i> ) nas quatro faces dos provetes T1N_550 e T2N_550Al2%. ....	76



Figura 5.32. Padrão de fendilhação e distância entre fendas ( <i>cm</i> ) nas quatro faces dos provetes T3N_550Si2% e T4N_550F0,5.....	77
Figura 5.33. Padrão de fendilhação e distância entre fendas ( <i>cm</i> ) nas quatro faces dos provetes T5N_550F0,5Al2% e T6N_350.....	77
Figura 5.34. Padrão de fendilhação e distância entre fendas ( <i>cm</i> ) nas quatro faces dos provetes T7N_350Al2% e T8N_350Si2%.....	78
Figura 5.35. Evolução da largura de cada fenda (nas quatro faces) ao longo do ensaio e escala colorida relativamente à média final da largura de cada fenda do provete T1L_550. ....	80
Figura 5.36. Evolução da largura de cada fenda (nas quatro faces) ao longo do ensaio e escala colorida relativamente à média final da largura de cada fenda do provete T2L_550Al2%. ....	80
Figura 5.37. Evolução da largura de cada fenda (nas quatro faces) ao longo do ensaio e escala colorida relativamente à média final da largura de cada fenda do provete T3L_550Si2%.....	81
Figura 5.38. Evolução da largura de cada fenda (nas quatro faces) ao longo do ensaio e escala colorida relativamente à média final da largura de cada fenda do provete T4L_550F0,5. ....	81
Figura 5.39. Evolução da largura de cada fenda (nas quatro faces) ao longo do ensaio e escala colorida relativamente à média final da largura de cada fenda do provete T5L_550F0,5Al2%. ....	82
Figura 5.40. Evolução da largura de cada fenda (nas quatro faces) ao longo do ensaio e escala colorida relativamente à média final da largura de cada fenda do provete T6L_350. ....	82
Figura 5.41. Evolução da largura de cada fenda (nas quatro faces) ao longo do ensaio e escala colorida relativamente à média final da largura de cada fenda do provete T7L_350Al2%....	83
Figura 5.42. Evolução da largura de cada fenda (nas quatro faces) ao longo do ensaio e escala colorida relativamente à média final da largura de cada fenda do provete T8L_350Si2%.....	83
Figura 5.43. Evolução da largura de cada fenda (nas quatro faces) ao longo do ensaio e escala colorida relativamente à média final da largura de cada fenda do provete T1N_550. ....	84
Figura 5.44. Evolução da largura de cada fenda (nas quatro faces) ao longo do ensaio e escala colorida relativamente à média final da largura de cada fenda do provete T2N_550Al2%.....	84
Figura 5.45. Evolução da largura de cada fenda (nas quatro faces) ao longo do ensaio e escala colorida relativamente à média final da largura de cada fenda do provete T3N_550Si2%. ....	85
Figura 5.46. Evolução da largura de cada fenda (nas quatro faces) ao longo do ensaio e escala colorida relativamente à média final da largura de cada fenda do provete T4N_550F0,5.....	85
Figura 5.47. Evolução da largura de cada fenda (nas quatro faces) ao longo do ensaio e escala colorida relativamente à média final da largura de cada fenda do provete T5N_550F0,5Al2%. ....	86
Figura 5.48. Evolução da largura de cada fenda (nas quatro faces) ao longo do ensaio e escala colorida relativamente à média final da largura de cada fenda do provete T6N_350.....	86
Figura 5.49. Evolução da largura de cada fenda (nas quatro faces) ao longo do ensaio e escala colorida relativamente à média final da largura de cada fenda do provete T7N_350Al2%.....	87
Figura 5.50. Evolução da largura de cada fenda (nas quatro faces) ao longo do ensaio e escala colorida relativamente à média final da largura de cada fenda do provete T8N_350Si2%. ....	87
Figura 5.51. Comparação de resultados entre os dois ensaios para varões lisos.....	88
Figura 5.52. Comparação de resultados entre os dois ensaios para varões nervurados. ....	89

Figura 5.53. Contribuição do betão entre fendas, exemplo de gráfico força-deslocamento, provete T1L_550.....	94
--	----

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 4.1. Valores característicos do aço A550, segundo o EC2. ....	43
Quadro 4.2. Misturas para a classe CA350. ....	44
Quadro 4.3. Misturas para a classe CA550. ....	45
Quadro 4.4. Valores caracterizadores do betão endurecido (compressão, tração e módulo de elasticidade). ....	48
Quadro 4.5. Valores obtidos no ensaio de tensão de flexão residual ....	49
Quadro 5.1. Níveis de tensão recolhidos para as várias misturas e tipos de varão.....	59
Quadro 5.2. Valores convertidos de $f_{cm,cil}$ . ....	60
Quadro 5.3. Tensão de abertura da 1ª fenda para classe CA550 de varões lisos. ....	67
Quadro 5.4. Tensão de abertura da 1ª fenda para classe CA350 de varões lisos. ....	68
Quadro 5.5. Tensão de abertura da 1ª fenda para classe CA550 de varões nervurados. ....	71
Quadro 5.6. Tensão de abertura da 1ª fenda para classe CA350 de varões nervurados. ....	72
Quadro 5.7. Quadro resumo do espaçamento máximo, médio, mínimo e número de fendas para os provetes com varões lisos. ....	76
Quadro 5.8. Quadro resumo do espaçamento máximo, médio, mínimo e número de fendas para os provetes com varões nervurados. ....	79
Quadro 5.9. Comparação resultados experimentais com os teóricos para varões lisos.....	91
Quadro 5.10. Comparação resultados experimentais com os teóricos para varões nervurados. ....	91
Quadro 5.11. Valores de $f_{ck}$ . ....	92
Quadro 5.12. Comparação dos resultados experimentais com os teóricos para varões lisos da tensão de aderência.....	93
Quadro 5.13. Valores de $f_{ctd}$ . ....	93
Quadro 5.14. Comparação dos resultados experimentais com os teóricos para varões nervurados da tensão de aderência. ....	93
Quadro 5.15. Comparação dos resultados experimentais com os teóricos para varões lisos, do contributo do betão entre fendas.....	95
Quadro 5.16. Comparação resultados experimentais com os teóricos para varões nervurados, do contributo do betão entre fendas.....	95

## SIMBOLOGIA

### Maiúsculas Gregas

$\Delta\delta_{cr}$	diferença de deformação numa secção fendilhada e não fendilhada, quando se forma a primeira fenda
$\Delta\epsilon_{sr}$	diferença entre $\epsilon_{sr2}$ e $\epsilon_{sr1}$
$\Omega$	valor de resistência elétrica

### Minúsculas gregas

$\alpha$	parâmetro de deformação, por exemplo, uma extensão, uma curvatura ou uma rotação
$\alpha_e$	relação $E_s/E_c$ ou $E_f/E_c$
$\alpha_I$	valores do parâmetro calculado para o estado não fendilhado
$\alpha_{II}$	valores do parâmetro calculado para o estado fendilhado
$\beta$	coeficiente que tem em conta a influência da duração do carregamento ou da repetição do carregamento na extensão média
$\beta_{cc}(t)$	coeficiente de endurecimento que depende da idade do betão
$\beta_d$	fator de ligação recomendado pelo ACI
$\beta_f$	fator que traduz a percentagem de betão fendilhado
$\delta_{armadura}$	deformação da armadura
$\delta_{tirante}$	deformação do tirante
$\epsilon_{cm}$	extensão média no betão entre fendas
$\epsilon_f$	extensão na armadura de fibra de vidro
$\epsilon_{s1}$	extensão da armadura quando o betão não está fendilhado
$\epsilon_{s2}$	extensão da armadura numa secção fendilhada
$\epsilon_{sm}$	extensão média da armadura para a combinação de ações considerada
$\epsilon_{sm}$	extensão média da armadura
$\epsilon_{smu}$	extensão média da armadura no instante da rotura
$\epsilon_{sr1}$	extensão da armadura quando se forma a 1ª fenda (considerando a contribuição do betão)
$\epsilon_{sr2}$	extensão da armadura numa secção fendilhada sob a ação das forças que originam a 1ª fenda
$\epsilon_{su}$	extensão de rotura da armadura
$\epsilon_{sy}$	extensão de cedência da armadura
$\epsilon_{uk}$	valor característico da extensão do aço na carga máxima

$\eta_1$	coeficiente que relaciona as condições de aderência e a disposição do varão
$\eta_2$	coeficiente em função do diâmetro
$\mu m$	micrómetro
$\pi_0$	baridade no estado anidro
$\rho$	massa volúmica do betão endurecido e seco em estufa
$\rho_{p,eff}$	taxa de armadura de tração em relação ao betão tracionado
$\rho_{p0}$	massa volúmica das partículas no estado anidro
$\rho_{ps}$	massa volúmica das partículas saturadas
$\sigma_f$	tensão na armadura de fibra de vidro
$\sigma_s$	tensão nas armaduras de tração, calculada na hipótese de secção fendilhada
$\sigma_s$	tensão da armadura numa secção fendilhada
$\sigma_{sr}$	tensão nas armaduras de tração, calculada na hipótese de secção fendilhada sujeita às condições de carregamento que provocam o início da fendilhação
$\sigma_{sr1}$	tensão da armadura quando se forma a 1ª fenda (considerando a contribuição do betão)
$\sigma_{srn}$	tensão da armadura no fim da estabilização da fendilhação, quando se forma a última fenda (considerando a contribuição do betão).
$\zeta$	coeficiente de distribuição
$\zeta_{exp}$	coeficiente de distribuição experimental

### Maiúsculas Latinas

$A_{c,eff}$	área efetiva de betão mobilizado por aderência
$A_N$	percentagem de absorção em relação ao estado de humidade natural
$AS$	percentagem de absorção de saturação
$\varnothing$	diâmetro dos varões
$E_c$	módulo de elasticidade do betão
$E_s$	módulo de elasticidade do aço
$F_s$	força de tração das armaduras
$H_p$	teor humidade interior das partículas
$I$	inércia da secção
$K_I$	rigidez no estado I
$K_{II}$	rigidez no estado II
$S_{r,máx}$	distância máxima entre fendas

$S_{r,méd}$	distância média entre fendas
$W_{55kN}$	largura da fenda característica para 55 kN de força
$W_{65kN}$	largura da fenda característica para 65 kN de força
$W_k$	largura característica da fenda
$W_{máx}$	largura máxima das fendas
$W_{méd}$	largura média das fendas
$W_{min}$	largura mínima das fendas

### **Minúsculas Latinas**

$f_{ctd}$	valor de cálculo da resistência do betão à tração
$f_{lc}$	tensão de rotura do betão à compressão
$f_{lcm}$	valor médio da tensão de rotura à compressão do betão leve
$f_{lct}$	tensão de rotura do betão leve à tração
$f_{lctk}$	valor característico da tensão de rotura à tração do betão leve
$f_{sym}$	valor médio da tensão de cedência do aço
$f_{ik}$	tensão característica de rotura da armadura
$f_{yk}$	tensão característica de cedência da armadura
$k_t$	coeficiente em função da duração do carregamento
$s$	coeficiente dependente do tipo de cimento
$t$	tempo/ idade do betão

## **Acrónimos**

<i>3002HE</i>	Superplastificante Viscocrete® 3002HE
<i>A/C</i>	Relação, em massa, água/cimento
<i>ACI</i>	American Concrete Institute
<i>BDN</i>	Betão de densidade normal
<i>BEAL</i>	Betão estrutural de agregados leves
<i>CEB</i>	Comité Euro-International du Béton
<i>D12</i>	Diâmetro 12mm
<i>D16</i>	Diâmetro 16mm
<i>EC2</i>	Eurocódigo 2
<i>FIP</i>	Fédération Internationale de la Précontraint
<i>FS</i>	Areia fina 0/2 mm
<i>MC90</i>	Model Code 1990
<i>MS</i>	Areia média 0/4





# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento

Ao longo do tempo, a produção desmedida, que tem vindo a dominar o lado evolutivo do homem, principalmente ao nível da construção, fez com que a utilização exagerada de energias contribuísse, numa grande parcela, para libertação de gases com efeito de estufa para a atmosfera (Torgal & Jalali, 2011).

Até ao século XVIII, o betão teve uma utilização muito diferente da que se verifica atualmente, acabando por ser exclusivo nas fundações e no interior das paredes de alvenaria. A crescente aplicação do betão surge após o desenvolvimento de estudos relativos às propriedades do cimento Portland realizados por Smeaton em 1758, James Parker (Parker, 1796) e Louis Vicat (Vicat, 1818) que vieram demonstrar as várias potencialidades, atualmente comprovadas, deste material. A partir daqui e nos anos seguintes, impulsionado pela revolução industrial, a construção virou-se para um novo patamar, tanto de crescimento exponencial em volume de construção nova, bem como utilização deste produto, capaz de fornecer todas as comodidades que o homem tanto procurava (Torgal & Jalali, 2011).

Fácil de trabalhar, custo acessível de produção, contudo, existe um custo ainda mais elevado que se veio a constatar ao longo dos anos, quando o betão passou a ser o produto mais utilizado atualmente no mundo. Com tudo isto, começou-se a perceber que esta utilização desmesurada estava a provocar uma gigantesca produção de gases para a atmosfera. Grande parte desses gases provinha da produção do elemento mais utilizado na produção do betão, o cimento. Estima-se que esta produção possa emitir por cada tonelada, cerca de 800 a 100 quilos de CO<sub>2</sub> (Torgal & Jalali, 2011).

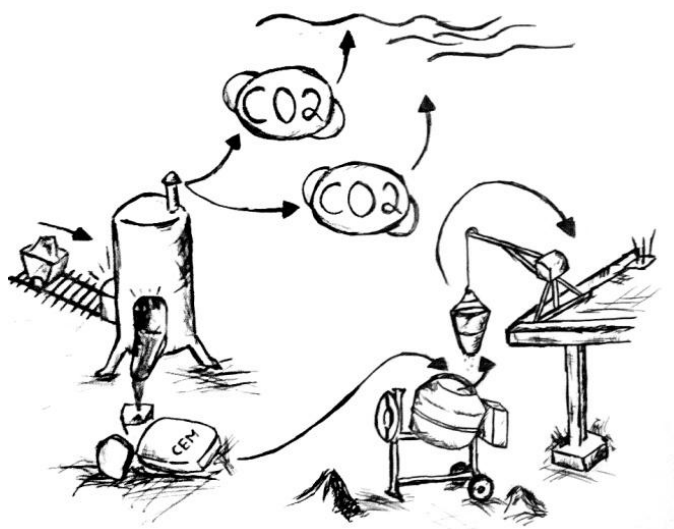


Figura 1.1. Esquema da produção e uso do cimento Portland e seus efeitos na emissão de CO<sub>2</sub>.

Atualmente, o desenvolvimento tecnológico, conduziu à produção de materiais e técnicas cada vez mais ecoeficientes e a introdução da nanotecnologia na indústria da construção, particularmente na produção de betão está a dar os primeiros passos. Provas deste esforço são as inúmeras publicações que têm surgido nesta área. Quando introduzidas partículas de tamanho nano, principalmente à base de sílica (por ser aquela que tem sido objeto de mais estudos), no betão, verificaram-se melhorias desde logo na capacidade resistente e de durabilidade. Isto, com o intuito de substituir progressivamente, o excesso de utilização do cimento, sem que a capacidade resistente das estruturas diminua. Estes avanços ao nível da microestrutura permitiram o desenvolvimento de várias capacidades intrínsecas no betão: i) uma boa densificação da sua matriz ligante (Figura 1.2), ii) redução da porosidade e iii) aumento da compacidade. Estes benefícios provaram ter resultados significativos ao nível macroscópico, melhorando o desempenho do betão (Heikal *et al.*, 2013), (Rashad, 2013). Este “novo” produto é designado na literatura atual como nanobetão (betão com a incorporação de nanopartículas na sua composição).

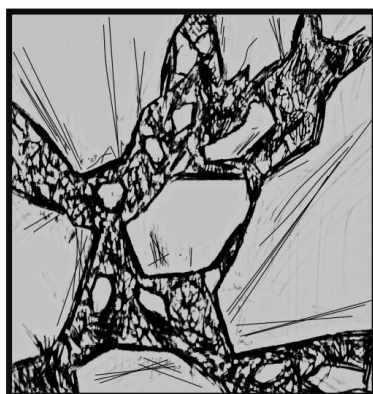


Figura 1.2. Densificação da matriz ligante.

Como referido anteriormente, o conceito de nanotecnologia, associada à produção de betão, aparece com a introdução na sua formulação de partículas de tamanho nano, sejam elas nanopartículas ou nanotubos. Geralmente esta percentagem de nanopartículas é calculada relativamente ao volume (ou massa) de ligante. As nanopartículas mais usadas são sílicas à base de óxidos, por serem aquelas que apresentam até agora os melhores resultados, na redução da porosidade e no aumento da compacidade do betão. No entanto, mais recentemente tem-se estudado outros tipos de nanopartículas, à base de alumínio, zinco, titânio e outros, e tem-se verificado que estas também são capazes de trazer alguns benefícios ao desempenho do betão (Rashad, 2013).

Os estudos realizados atualmente, relativos a este novo material (nanobetão), (Lourenço *et al.*, 2015), centram-se essencialmente no estudo: i) da durabilidade e ii) resistência mecânica. Há ainda poucas referências, na literatura, relativas ao comportamento estrutural do nanobetão, nomeadamente, estudos sobre a aderência betão-aço. Esta ausência de informação e estudos serviu como o ponto de partida para a realização desta dissertação, onde se procurará

compreender melhor este fenómeno. Existe uma janela aberta na curiosidade sobre este comportamento. Espera-se que a incorporação de nanopartículas possa aumentar a aderência entre a matriz ligante e as armaduras, alterando a habitual transferência das tensões entre o aço e o betão e afetando (reduzindo), conseqüentemente, o comprimento de amarração.

A ciência associada ao betão armado não é uma ciência estagnada. Em paralelo com novas invenções, apareceu o conceito de fibras metálicas incorporadas nas misturas de betão. A ideia de introduzir filamentos no meio de ligantes não apareceu agora. Desde o antigo Egito (cerca de 3000 anos a.C.) que o uso de palha intercalada no interior de uma amassadura mostrou dar uma crescente resistência a estrutura final. Num passado recente (desde o ano 1960), a tecnologia permitiu produzir e estudar pequenas fibras metálicas, algumas constituídas por vários elementos combinados (ACI 544).

A introdução de fibras metálicas nas misturas de betão surge no sentido de melhorar o desempenho do betão não só a nível de resistência mecânica mas, também, para um maior e melhor controlo da largura de fendas e do espaçamento entre estas. As fibras apresentam, ainda, um papel importante no comportamento de elementos ao corte e à fadiga quando se encontram em serviço. Constatou-se que o comportamento dos elementos com fibras depende de vários fatores como sejam: i) a dosagem de fibras; ii) a esbelteza; iii) da orientação das fibras na mistura; iv) composição da mistura de betão.

Com os resultados otimistas a que os investigadores têm chegado, é de prever que a investigação associada aos diferentes tipos de fibras (materiais e formas) continue a crescer e que a utilização destas possa aumentar (ACI 544) (Fernandes, 2012).

## 1.2 Objetivos

O presente trabalho, apresenta como principal objetivo o estudo da aderência aço-betão, em betões incorporando na sua formulação nanopartículas e fibras metálicas. Associado a este objetivo estudar-se-á o padrão de fendilhação de elementos de betão armado, neste caso tirantes, produzidos também com betões incorporando nanopartículas e fibras metálicas. Para se atingir estes objetivos definiu-se um programa experimental relativamente extenso que produziu resultados que ajudarão a esclarecer a influência da introdução de nanopartículas e fibras metálicas na aderência e fendilhação.

## 1.3 Estratégia

Para atingir os objetivos propostos, foram produzidos provetes para oito misturas diferentes. Para tal, produziram-se duas misturas de referência, para duas classes de resistência diferentes, designadas por CA550 (com uma resistência média à compressão de aproximadamente 60 MPa) e CA350 (com resistência média à compressão de aproximadamente 33 MPa). Posteriormente foram adicionadas, a estas misturas: i) nanopartículas de sílica, CA550\_Si2% e CA350\_Si2%; ii) nanopartículas de alumínio,

CA550\_Al2% e CA350\_Al2%; iii) fibras metálicas, CA550\_F0,5; iv) nanopartículas de alumínio e fibras metálicas, CA550\_Al2%\_F0,5.

Os ensaios realizados foram: i) ensaios à tração de tirantes de betão armado e ii) ensaios *Pull-Out*. Tentando assim perceber, com base no primeiro tipo de ensaios, o comportamento dos tirantes nomeadamente ao nível do i) espaçamento e largura de fendas, ii) rigidez no estado I e II. No ensaio de tipo *Pull Out*, pretendeu-se analisar e comparar a máxima tensão de aderência para as várias misturas.

## 1.4 Organização do trabalho

A presente dissertação está organizada em 6 capítulos, cada um debruçando-se sobre os vários conceitos necessários para o bom entendimento do tema abordado neste trabalho. Será também apresentando todas as etapas e toda a envolvimento necessária para a realização dos ensaios referidos atrás.

No primeiro capítulo faz-se um enquadramento geral do tema. Apresentando o estado da arte que envolve a temática em desenvolvimento. Enumeram-se os objetivos propostos e toda a estratégia para que estes possam ser cumpridos.

O segundo capítulo aborda os materiais utilizados neste trabalho, como é o caso das nanopartículas e as fibras metálicas. Nele, apresenta-se a história destes dois materiais, incluindo o seu aparecimento e desenvolvimento, focando ainda algumas das suas características quando introduzidos no betão.

Observando o tema geral da dissertação, aparece o termo aderência. No terceiro capítulo, faz-se um esclarecimento deste fenómeno, todas as componentes que ele envolve e a sua importância no comportamento das estruturas de betão armado.

No quarto capítulo descreve-se o programa experimental realizado. Apresenta-se todo o trabalho laboratorial, incluindo a produção e realização de todos os ensaios.

No quinto capítulo são analisados e discutido os resultados obtidos. Todo o tratamento e verificação dos dados é abordado neste capítulo.

O sexto capítulo, engloba as principais conclusões suscetíveis de serem retiradas a partir dos resultados analisados no capítulo anterior. Apresenta-se ainda, algumas propostas para trabalhos futuros, esperando-se assim que a investigação sobre este tema, ou relacionados, continue.

## 2. NANOPARTÍCULAS E FIBRAS METÁLICAS

### 2.1 Breve Notas Históricas sobre Nanopartículas

O conceito primário da nanociência e da nanotecnologia, teve uma primeira elocução numa palestra intitulada *"Há muito espaço lá no fundo"*, pelo físico Richard Feynman, numa reunião da Sociedade Americana de Física no Instituto de Tecnologia da Califórnia, em 29 de dezembro de 1959. Desde então houve uma crescente curiosidade pela capacidade de poder manipular a matéria a um nível extremamente pequeno e inacessível para o comum humano. Contudo, só umas décadas mais tarde, foi possível examinar esse mundo escondido, nas explorações do professor Norio Taniguchi, acabando assim por cunhar definitivamente o termo nanotecnologia (Feynman, 2015).

Com este novo conhecimento e o aparecimento de microscópios capazes de ir até esse novo mundo, abriu-se então uma nova janela da tecnologia. Isto permitiu trabalhar a uma escala na ordem do bilionésimo de um metro ( $1\text{nm}=1\times 10^{-9}\text{m}$ ). Essa capacidade de agir a uma escala atômica, vem facilitar de uma forma que se espera notável, a obtenção de funções e propriedades, que depois se refletem a um nível macro (Rashad, 2013).

A Figura 2.1, mostra e compara a realidade de escala que o nanomundo veio pôr a descoberto.

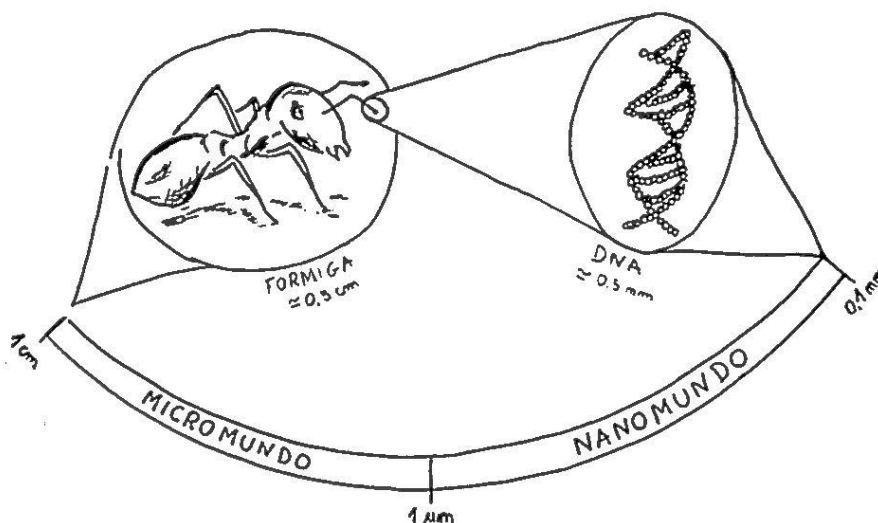


Figura 2.1. Imagem comparativa de escalas.

A base da nanotecnologia, ou seja, a sua forma de atuar, fixa-se no seu desenvolvimento sobretudo no campo da física e da química das diversas áreas. A vontade de impregnar na engenharia dos materiais este conceito é um dos caminhos que se alicia alcançar. Embora esta tecnologia ainda seja recente, existe um esforço para a realização de cada vez mais estudos, levando a que os cientistas e engenheiros progressivamente apresentem uma panóplia de novos materiais em nanoescala. Estes avanços vieram melhorar as propriedades dos materiais,

tais como: i) maior resistência, ii) menor peso, iii) maior controle do espectro de luz, e iv) maior reatividade química (Feynman, 2015).

Na área da construção são vários os resultados já obtidos em tão poucos anos de pesquisa. Os materiais de revestimentos são um bom exemplo disso: i) as tintas, onde a substituição da base solvente por uma aquosa, faz com que a libertação de cheiros agressivos e emissões compostos orgânicos voláteis seja diminuta, ii) isolamentos térmicos muito eficientes e sem a utilização de recursos não renováveis, havendo, mais uma vez, ganhos do ponto de vista ambiental (Fontinha & Salta, 2012). Um outro exemplo de aplicação bem sucedido da nanotecnologia, são painéis mais leves e flexíveis, e com capacidade de armazenamento de energia fotovoltaica (Fontinha & Salta, 2012).

## 2.2 Uso de Nanopartículas nos Betões

A melhoraria não só do desempenho mas também da ecoeficiência do betão é algo que apraz, positivamente, o setor da construção civil, uma vez que, a preocupação com a sustentabilidade é cada vez maior. Em Portugal, o mercado com produtos que resultem da nanotecnologia ainda é praticamente inexistente. É necessário a realização de mais estudos e melhorar a forma de usar esta ferramenta, isto é a nanotecnologia, em proveito de novos produtos (Smart Innovation, 2014).

Um dos aspetos que despertou o interesse para incorporar as nanopartículas no betão, foi perceber qual o efeito que se poderia desenrolar nas reações no processo de hidratação do cimento. Pelo facto das nanopartículas apresentarem uma elevada razão da superfície específica por volume, conferindo-lhe uma elevada reatividade, elas comportam-se como centros de nucleação, contribuindo para o processo de hidratação do cimento Portland e preenchimento dos nanoporos, como mostra a Figura 2.2. (Torgal & Jalali, 2011).

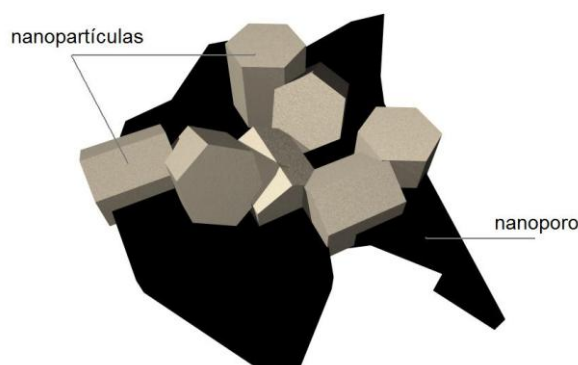


Figura 2.2. Preenchimento dos nanoporos pelas nanopartículas.

Através dessa capacidade, denominada por efeito fíler, as nanopartículas podem ser usadas simplesmente como material de enchimento levando a i) redução da porosidade, ii) melhorias

ao nível da durabilidade. Facilmente se percebe que a introdução destas partículas irá afetar diretamente a compacidade do betão e, consequentemente, aumentar a sua resistência, devido ao acréscimo de compostos que levam a uma densificação da matriz ligante.

A durabilidade do betão está, em parte, relacionada com o facto do cimento Portland conter uma elevada quantidade de hidróxido de cálcio, tornando-o muito suscetível ao ataque químico. Por outro lado, como o betão é um material poroso e permeável, permite o ingresso de água, gases e substâncias agressivas para o seu interior (Torgal, 2012), (Torgal & Oliveira, 2012). Estes agentes podem provocar a carbonatação e a degradação das armaduras das estruturas de betão e, consequentemente levar a necessidades de conservação e reabilitação ou, em casos mais extremos da substituição de elementos estruturais. Assim, a durabilidade das estruturas de betão toma um papel importantíssimo no que diz respeito à ecoeficiência. Mora (Mora, 2007) aponta que o aumento da durabilidade de 50 para 500 anos do betão equivaleria a uma redução de 10 vezes o seu impacto ambiental (Nunes, 2011), (Du *et al*, 2014).

De um modo mais particular, e continuando a análise do panorama atual da ciência nesta área, é pertinente enumerar quais as nanopartículas mais utilizadas. Uma revisão rápida da literatura atual permite identificar uma gama de nanopartículas. Tendo por base os trabalhos de pesquisa consultados as nanopartículas mais utilizadas nos betões são a nano-sílica (nano-SiO<sub>2</sub>) e a nano-dióxido de titânio (nano-TiO<sub>2</sub>). Havendo muitas outras criadas e estudadas como é o caso de nano-dióxido de zinco (nano-ZnO<sub>2</sub>), nano-óxido de ferro III (nano-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e também nano-óxido de alumínio III (nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), (Rashad, 2013).

O tipo de nanopartícula mais conhecida, e de certo modo mais estudada na averiguação das melhorias das propriedades mecânicas e de durabilidade do betão é a nano-SiO<sub>2</sub>. A elevada atenção na nano-SiO<sub>2</sub> deve-se aos bons resultados primários, em características como a ação pozzolânica, bem como no eficiente preenchimento dos já mencionados nanoporos (Rashad, 2013).

A introdução de outros tipos de nanopartículas com propriedades fotocatalíticas, pode ainda contribuir para o efeito de autolimpeza superficial. Por exemplo, através da introdução de nanopartículas hidrofílicas de TiO<sub>2</sub> (nano-titânio), pode-se promover um efeito capaz de repelir a sujidade (Nunes, 2011).

Todos estes benefícios podem não ser alcançados e não existir a obtenção dos resultados pretendidos, se a dosagem de nanopartículas introduzida nas várias formulações não for a ideal. É, portanto, necessário conseguir uma boa dispersão das nanopartículas na matriz cimentícia, mas também (e já estudado) evitar percentagens elevadas de nanopartículas porque podem trazer problemas no atraso da reação da água com o clínquer.

Said, Zeiden, Bassuoni e Tian (2012) nos seus estudos, observaram que as misturas cimentícias, com cinzas volante e nano-SiO<sub>2</sub>, não só apresentavam melhorias ao nível da

reatividade da mistura, mas também na densificação da sua matriz. Num outro ponto, Li (2004), comprovou um acréscimo de cerca de 19% da temperatura de hidratação do cimento, aquando da introdução de uma percentagem de nanopartículas na ordem dos 4%, em betões com 50% de cinza volantes. Verificou ainda que aos 3 dias havia um aumento de 81% na resistência do betão.

Embora as restantes nanopartículas não tenham ainda sido tão estudadas como o caso da nano-  $\text{SiO}_2$ , é de referir que a incorporação de nano-  $\text{Al}_2\text{O}_3$  apresentou também (Nazari, 2012) aumentos de resistência mecânica à compressão comparativamente com amostras desprovidas de nanopartículas, desde que a percentagem de dosagem não ultrapassasse os 2%.

Com a adição de nano- $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e nano- $\text{ZnO}_2$ , vários autores observaram melhorias ao nível: i) das resistências (compressão, tração e flexão), ii) redução do tempo de endurecimento do betão e iii) percentagem de absorção de água. Por outro lado, no caso da adição de nano- $\text{ZnO}_2$  a trabalhabilidade das misturas apresentou uma diminuição significativa, sendo um entrave à utilização desta nanopartícula (Nazari, 2010), (Nazari, 2011).

Com uma visão mais economicista e por apresentar um comportamento quimicamente estável, para além dos bons resultados na sua aplicação, a nano-  $\text{TiO}_2$  é das poucas nanopartículas, que já foi utilizada em obra (Igreja “*Dives in Misericórdia*” em Roma). A sua capacidade de autolimpeza, ajuda a proteger o betão, principalmente em betões expostos ao meio ambiente (sujidades exteriores e água das chuvas), contudo apresentada o inconveniente de só ser ativado ou agitado, através da incidência da radiação ultravioleta, uma pequena fração de toda a radiação solar (Nazari, 2010), (Nazari, 2011).

## 2.3 Breve Notas Históricas sobre Fibras

Quando o homem começou a desenvolver a capacidade para criar e melhorar as propriedades dos materiais verificou-se, logo no início, que a introdução de filamentos no interior dessas peças resultava numa vantagem em termos resistentes. Este processo começou com o uso de palha no interior dos tijolos cozidos, ou até mesmo crina de cavalo no reforço de argamassas de gesso (Fernandes, 2012).

Com o avanço tecnológico, o homem começou a dominar outras técnicas, algumas delas mostraram-se prejudiciais à saúde, neste caso, poder-se-á dar destaque ao uso de amianto, que tanto brilhou, a nossa exponencial evolução na capacidade de novas construções.

O cair de uma ideia, vulgarmente precisa de uma nova solução, esta é a base da evolução, e assim surgiu o aparecimento e substituição de novas fibras, que introduziu melhorias no comportamento da peça final em termos de resistência, tensões de tração e compressão, fendilhação, durabilidade, fadiga entre outros (Fernandes, 2012). Na Figura 2.3 esquematiza-se a evolução dos filamentos usados para reforço.



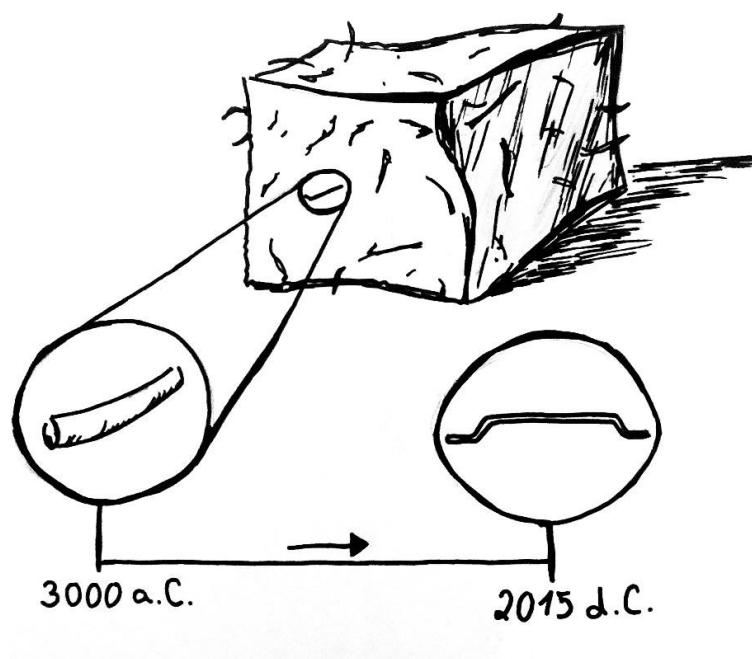


Figura 2.3. Evolução do uso de filamentos no interior de amassaduras na história.

Atualmente o uso de fibras é cada vez mais vasto e aceite pela comunidade técnica, sendo as mais comuns: i) as fibras metálicas, ii) de carbono, iii) materiais sintéticos (poliester, polietileno, polipropileno e nylon) e iv) fibras naturais.

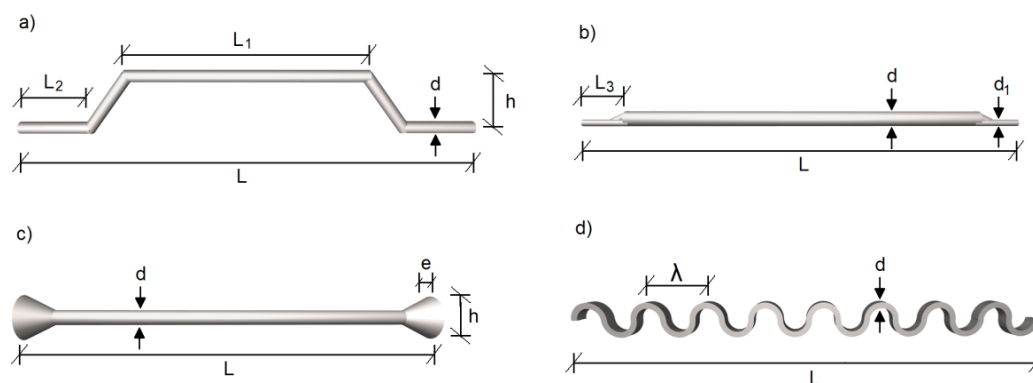
Nesta dissertação o foco será sobre as fibras metálicas, contudo existe atualmente um enorme panorama de estudos com os outros tipos de fibras, que podem ser encaradas como uma alternativa viável (Fernandes, 2012).

## 2.4 Fibras metálicas em Betões

Durante as últimas décadas têm sido vários os estudos realizados com betões reforçados com fibras, tanto nos estados fresco como endurecido. Nos últimos 15 anos a investigação tem-se debruçado sobre o estudo estrutural de elementos de betão reforçado com fibras (Oliveira, 2010).

A forma das fibras usadas no betão pode ser muito variada, desde a forma circular até à forma retangular, ou até mesmo em espiral (Fernandes, 2012). Neste trabalho apenas se apreciará as circulares (pois foram o tipo de fibras usadas nos ensaios descritos no Capítulo 4).

A Figura 2.4, mostra algumas das várias formas existentes no mercado atualmente.



**L**-comprimento total da fibra; **L<sub>1</sub>**- comprimento da parte não ancorada da fibra; **L<sub>2</sub>**- comprimento da ancoragem em gancho; **L<sub>3</sub>**- comprimento da parte reduzida da fibra; **d**- diâmetro da fibra; **d<sub>1</sub>**- diâmetro reduzido da fibra; **h**- altura da ancoragem; **e**- espessura da parte alargada da fibra; **λ**- comprimento da onda da fibra.

Figura 2.4. Exemplos de fibras: a) Fibra com amarração em gancho; b) Fibra com extremidade reduzida; c) Fibra com extremidade alargada; d) Fibra ondulada. (adaptado de Ulrix. E. (2011)).

A razão entre comprimento/diâmetro, isto é a sua esbelteza, varia normalmente entre os 20 e 100, sendo suficientemente pequenas para que a sua dispersão no interior do betão possa ser adequada e não origine problemas. Esta esbelteza, aliada a variáveis como a forma das suas extremidades (onduladas, rugosas, gancho), que tem o intuito de aumentar a sua aderência ao betão e também o seu revestimento (geralmente galvanizado para impedir a sua corrosão), tornam estas pequenas “agulhas” uma forte arma na melhoria do comportamento do betão armado (Fernandes, 2012).

Tudo isto, acarreta novas propriedades ao betão, tanto no estado fresco como endurecido. A apreensão quanto à alteração do que era sabido, relativamente ao comportamento do betão simples nestes dois estados, com a introdução deste tipo de fibras, deixa em aberto a necessidade de perceber o novo comportamento. Desde logo o comportamento do betão no estado fresco, depende: i) da quantidade de fibras introduzido, ii) da esbelteza e iii) geometria das fibras (Fernandes, 2012).

Em alguns betões o *slump*, pode baixar, não significando necessariamente que a colocação e vibração em obra se façam com maior dificuldade. Para isso, é necessário que a trabalhabilidade não se altere, embora se venha a constatar em vários estudos que esta propriedade não é alterada significativamente com a introdução de fibras. Caso haja uma alteração significativa é possível recorrer ao uso de superplastificantes de alta gama. De notar que as fibras ao entrosar-se na amassadura podem trazer, posteriormente, na colocação do betão, maiores dificuldades na passagem por entre as armaduras. Existe uma atenção extra a ter em conta, no momento de vibração, pois as fibras podem apresentar uma orientação (o que

não é totalmente desejado, pois alteraria o seu efeito no betão endurecido), que depende da intensidade de vibração ou até mesmo da altura de queda do betão.

No estado endurecido, existem vários parâmetros de análise depois de adicionadas fibras metálicas ao betão, que perante os vários estudos já realizados, podem ser enumerados da seguinte forma: i) resistência mecânica à compressão; ii) resistência mecânica à tração; iii) resistência mecânica à flexão; iv) Resistência ao corte; v) fadiga; vi) condutibilidade térmica; vii) durabilidade (Fernandes, 2012).

#### **2.4.1 Resistência mecânica à compressão**

Neste parâmetro, a existência de fibras metálicas, no interior do betão, em pouco ou nada influencia o seu comportamento. Ficando apenas de notar, o comportamento relativamente ao tipo de fratura apresentada pelos provetes. A adição de fibras garante um acréscimo da ductilidade e consequente maior deformação após a rotura do betão, uma vez que neste momento as tensões impostas no provete passam a ser suportadas, quase em exclusivo pelas fibras, detentoras de uma grande capacidade de dúctil (Fernandes, 2012).

#### **2.4.2 Resistência mecânica à tração**

O betão, sendo um material frágil, não resiste, significativamente, a esforços de tração. A incorporação de fibras metálicas vem alterar as propriedades de deformação dos materiais no regime pós-elástico. A amplitude destas modificações pode depender dos vários fatores, tais como: (i) a resistência da matriz; (ii) o tipo de fibra; (iii) as características de adesão relacionadas com a superfície da fibra; (iv) a dosagem e orientação das fibras; (v) a dimensão máxima do agregado (Ulrix e Ferreira, 2011).

As fibras transmitem para o betão a sua ductilidade, capacitando assim de melhor resistência às tensões de tração aplicadas (Fernandes, 2012) (ACI 544).

#### **2.4.3 Resistência mecânica à flexão**

Na resistência à flexão, as fibras apresentam um papel importante. Quando se aplica uma carga a meio vão de um provete, o acréscimo de tensão de rotura é significativo. Esta melhoria prende-se com o deslocamento do eixo neutro da peça, para a zona comprimida, alterado pela distribuição de tensões que as fibras impõem. Tudo isto, depende da capacidade aderente entre as fibras e o próprio betão, bem como da percentagem de fibras que foram incorporadas. Sabe-se também que para altas dosagens de fibras o seu efeito, em comparação com o betão simples, deixa de ser particularmente eficiente (Fernandes, 2012)

#### **2.4.4 Resistência ao corte**

Analisando o seu efeito em corte puro, e de acordo com estudos já realizados, o uso de uma percentagem reduzida de fibras (1%) pode levar a melhorias no sentido da resistência ao corte, variando entre o não benefício até a melhorias até 30%. Verifica-se assim, que não existe linearidade neste comportamento, entrando em jogo outros fatores, como por exemplo,

a orientação das fibras (Fernandes, 2012) (ACI 544). A aleatoriedade e a distribuição das fibras dentro do betão, alteram o padrão de fendilhação que é mais distribuído e com menores larguras nas fendas, como consequência do aumento da tensão de tração do betão com fibras, apresentando-se assim como fatores a ter em consideração.

Muitos investigadores interrogam-se sobre a capacidade de substituição que este tipo de betão (betão com fibras) pode ter sobre o uso de estribos no betão armado. Estudos feitos mostram benefícios que podem ir nesse sentido.

#### 2.4.5 Fadiga

Uma vez que o incremento de fibras, como já referido, limita a abertura das fendas (distribuição de tensões), então quando se fala na aplicação de uma carga contínua, haverá um aumento em termos de resistência à fadiga quando se usa fibras no betão (Fernandes, 2012).

#### 2.4.6 Condutibilidade térmica

Para percentagens baixas de fibras incorporadas no betão, é conclusivo que a condutibilidade térmica pode aumentar ligeiramente (Fernandes, 2012).

#### 2.4.7 Fendilhação por retração

A retração do betão acontece devido ao processo de redução de volume, que ocorre pela sistemática perda de água (hidratação cimento, evaporação, etc.). As fibras em nada afetam este processo, contudo à medida que o betão vai retraindo, podem aparecer tensões de tração e, conseqüente, aparecimento de fendas. Nestes casos, as fibras podem funcionar (como referido anteriormente), e impedir um aumento excessivo da largura dessas fendas (Fernandes, 2012).

A Figura 2.5 apresenta um esquema ilustrativo da distribuição de tensões com ou sem o uso de fibras na matriz.

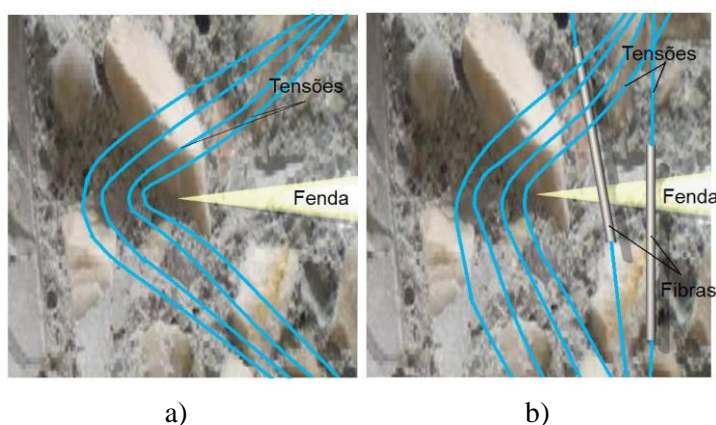


Figura 2.5. Esquematização do fluxo das tensões no betão. a) sem fibras metálicas; b) com fibras metálicas (Adaptado de Vitt, 2011).

### 2.4.8 Durabilidade

A durabilidade consiste basicamente, na capacidade de preservar o interior do betão, dificultando a penetração de cloretos e a ocorrência de carbonatação. Garantindo assim que as armaduras, no seu interior, não são afetadas pelo fenómeno de corrosão. Sendo este tipo de fibras, oriunda da família dos metais, a sensibilidade para serem corroídas é elevada. Para contrariar este fenómeno, normalmente as fibras são de aço inox ou galvanizadas, permitindo assim aumentar a sua resistência à corrosão, caso o betão deixe que os cloretos penetrem (Fernandes, 2012).

### 2.4.9 Comportamento ao arrancamento das fibras metálicas

Uma vez que este trabalho assenta no uso de fibras metálicas com amarração em gancho, fica pertinente uma breve explicação sobre o modo de arrancamento deste tipo de material. Segundo Ulrix (Ulrix, 2011), em comparação com provetes sem fibras, o uso de fibras com amarração em gancho é responsável por um acréscimo de, aproximadamente, 90 % na resistência ao arrancamento.

O arrancamento das fibras no interior do betão está ligado ao tipo de betão. Quanto maior for a resistência mecânica do betão maior será a tensão de arrancamento. Em casos onde a resistência da matriz ligante é elevada o fenómeno de arrancamento da fibra deixa de existir, passando, em substituição, pela rotura da própria fibra.

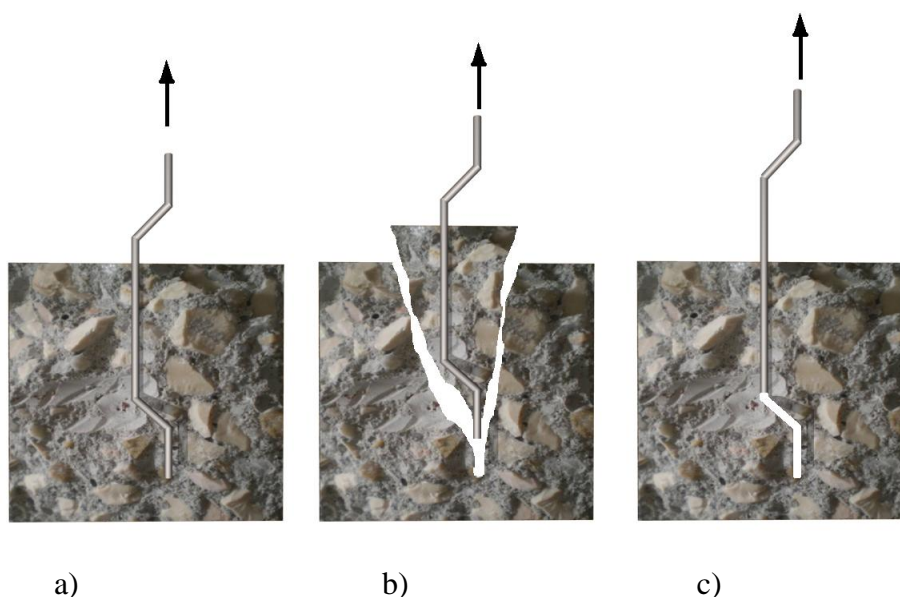


Figura 2.6. Processo de arrancamento de fibras metálicas em forma de ganchos. a) força aplicada; b) arrancamento por rotura do betão sem deformação da fibra; c) arrancamento por deformação do gancho. (Adaptado de Fernandes, 2012).

Contudo o modo de arrancamento de uma fibra pode ocorrer de duas maneiras distintas i) rotura do betão sem deformação e ii) escorregamento da fibra por deformação (Figura 2.6). Na primeira, o modo como a fibra é arrancada está ligado ao comprimento de fibra entranhado no betão e a sua direção relativamente à força de arrancamento. A segunda está relacionada, com a capacidade de deformação da fibra. À medida que a força de arrancamento é aplicada o gancho começa a deformar até praticamente deixar de existir, levando ao deslizamento da fibra (Ulrix e Ferreira, 2011).

### 3. ADERÊNCIA AÇO\_BETÃO

Uma boa aderência aço-betão é fundamental para o sucesso do betão armado, pois é através desta ligação que as tensões entre o aço e o betão são transferidas de forma eficaz entre si.

Na base deste conceito, está a necessidade destes dois materiais, aço e betão, funcionarem como um só, para quando a estrutura estiver sobre o efeito das ações possam, de forma conjunta, cobrir as fragilidades que individualmente estes dois materiais poderiam apresentar. A elevada degradação da aderência aço-betão, leva de uma forma imediata à iniciação de escorregamento do aço no betão, sendo uma das razões para colapso e danos importantes nas estruturas, como por exemplo na ocorrência de sismos (Hadi, 2008).

Este fenómeno de elevada complexidade, devido à multiplicidade de mecanismos que ocorrem, tem vindo a ser estudado ao longo dos anos, e à medida que o uso do betão armado foi crescendo, houve ainda mais estudos. Embora a sua compreensão teórica esteja, hoje em dia, totalmente bem definida, deixa ainda, algumas interrogações práticas acerca de como o fenómeno realmente se desenvolve e acerca da sua abordagem analítica, (Hadi, 2008).

Apesar dos inúmeros estudos realizados ao longo dos anos, esta temática volta a ser assunto importante, cada vez que um “novo” tipo de betão aparece (betões auto compactáveis, reforçados com fibras, nanobetão, etc..), sabendo à partida, que o comportamento para cada nova “*estirpe*” de betão será diferente do convencional. O porquê da necessidade de se saber mais sobre este fenómeno, prende-se com a importância e a necessidade de estabelecer regras para o cálculo e dimensionamento das estruturas, nomeadamente o cálculo de emendas, comprimentos de amarração, controlo de fendilhação e armaduras mínimas (Hadi, 2008).

#### 3.1 Definição de aderência betão-aço

De uma forma geral, a aderência aparece associada a três fenómenos/componentes distintos, que ocorrem normalmente, de forma sequencial. Na literatura atual, avolumada por vários autores, como Fusco (1995), estas parcelas são apresentadas como: i) adesão química, ii) aderência mecânica e iii) atrito. Entendendo-se de forma abreviada, que a primeira se baseia na adesão existente inicialmente entre a pasta de cimento e o próprio aço. A aderência mecânica entende-se como a parcela que está associada à existência de nervuras no aço. Por último, o atrito produzido entre as duas superfícies (betão-aço) (Louro, 2014). Contudo, ainda neste capítulo, será explicado cada um destes fenómenos de forma mais aprofundada.

A eficácia da ligação betão-aço aparece inevitavelmente associada à relação da tensão de aderência versus deslizamento. Esta relação expressa-se no deslocamento relativo que o varão de aço tem com o betão envolvente, representando assim a variação da tensão na sua interface. Os pequenos deslizamentos do varão implicam danos mais locais (adesão química), com o crescente aumento do deslizamento há a quebra total na aderência e consequente aumento da fendilhação e deformação.

A perda de aderência vai até ao ponto onde deixa de existir qualquer tipo de ligação entre o betão e o aço e há, consequentemente, a quebra da função estrutural do betão armado (Hadi, 2008).

No dimensionamento de estruturas de betão armado, a aderência tem um papel fundamental, tanto ao nível de estados último como de utilização. Uma boa aderência ao nível dos estados limite de utilização, é importante para limitar as deformações assim como a abertura de fendas, essencial para o bom funcionamento e aspeto da estrutura. Por outro lado, nos estados limite último, a aderência irá interferir na amarração das armaduras existentes no interior do betão, originando eventualmente um aumento da capacidade geral da estrutura em termos de suporte de cargas (Louro, 2014).

No geral, a distribuição das tensões de aderência não segue leis simples, dependendo muito de fenómenos de retração, fluência e fendilhação do próprio betão. A aderência é também influenciada pelo histórico dos carregamentos. Uma ação cíclica vai provocar uma diminuição de resistência, em termos de aderência, devido ao efeito de fadiga da estrutura (Louro, 2014).

É importante perceber a necessidade de fazer um equilíbrio lógico, quanto ao nível de aderência. As estruturas de betão devem apresentar um comportamento dúctil, não só para que toda a capacidade de carga do aço seja aproveitada, mas também para que seja possível perceber quando uma estrutura já está próxima da rotura. É também necessário haver uma boa aderência para existir um bom comportamento mecânico, isto é, deve permitir que haja elevadas extensões no aço, sem deslizamentos das armaduras, por forma a garantir ductilidade às peças de betão armado (Louro, 2014).

As peças de betão armado podem ser solicitadas, de forma simultânea, com esforços de compressão e tração, tornando-se a aderência em ambas as situações fundamental. Nas zonas de compressão, o comportamento dos dois materiais é aproximadamente igual, com as mesmas deformações. Na zona tracionada, onde o betão apresenta fraca resistência e uma rotura frágil, a existência de aderência é fundamental, para impedir o deslocamento relativo entre a armadura e o betão.

Na interface entre o aço e o betão, depois de atingidas tensões elevadas, a sua rotura pode dar-se de duas formas distintas. A rotura por deslizamento do varão de aço, que se prende com a rotura do betão presente entre as nervuras e acontece invariavelmente quando o betão circundante do varão é insuficiente para resistir às tensões radiais. Por outro lado, a rotura da interface pode ocorrer pela rotura do próprio betão, isto é, quando as tensões aplicadas excedem a capacidade resistente do betão à tração. Nestes casos formam-se fendas grandes nas direções transversal e longitudinal, ocorrendo no fim o destacamento do betão em pedaços (Louro, 2014).



### 3.2 Aderência em varões de aço lisos e nervurados

O bom comportamento quanto à boa transmissão das forças das armaduras ao betão depende, essencialmente, da máxima aderência conseguida entre os dois materiais. A forma de maximizar a aderência aparece com o uso de varões rugosos. Muitas das vezes, quando os aços trabalham a tensões elevadas, a falta do uso de rugosidade nos varões implica o aparecimento de uma fendilhação exagerada e não pretendida pelos regulamentos (D'Arga, 2004).

O tratamento do problema da fendilhação passa pela exigência do uso de varões com rugosidade elevada, ou seja o uso de nervuras. Assim, apareceu o conceito de “varões de alta aderência”, são varões que permitem uma aderência de um grau elevado.

Os varões que não apresentam estas características, quanto ao elevado grau de aderência, denominam-se por “varões de aderência normal”. Os varões lisos são um exemplo deste tipo de varões, por apresentarem uma superfície relativamente lisa onde a aderência, principalmente, a mecânica e o atrito são quase nulas. Como consequência, as estruturas providas com este tipo de varão têm um nível exagerado de fendilhação (D'Arga, 2004).

Por vezes os varões nervurados também podem ser designados por varões do tipo “aderência normal”, dependendo de dois critérios essenciais, um deles baseado nas dimensões e configuração das rugosidades e o outro tem em conta os resultados dos ensaios realizados sobre os varões (D'Arga, 2004).

### 3.3 Diagrama típico do comportamento de varões de aço na aderência

A complexidade de fenómenos que interferem na aderência varia com o tipo de varão usado. Na Figura 3.1, apresenta-se um diagrama típico, tensão-deslocamento, para varões lisos e nervurados, também designados na literatura atual por varões de alta aderência e varões de aderência normal, respetivamente. Neste diagrama, verifica-se até à fase 1, existente em ambos os varões, que para valores muito baixos de tensão, não existe praticamente deslocamento do varão, trata-se da fase de adesão química. Seguidamente, inicia-se o deslizamento do varão, entrando-se na fase de aderência mecânica. Nesta fase, os dois tipos de varões apresentam comportamentos distintos. Nos varões lisos, devido ao limite da deformação elástica do betão à tração, há um deslocamento maior devido ao aparecimento de microfendas, que se desenvolvem no betão junto ao varão. Essas microfendas aparecem devido às tensões de corte entre os dois materiais. A existência deste deslizamento leva a que o comportamento do varão (liso) se altere até à fase 2. A fase seguinte corresponde ao arrancamento progressivo do varão, com grandes deslocamentos inerentes a esse processo, até ao final.

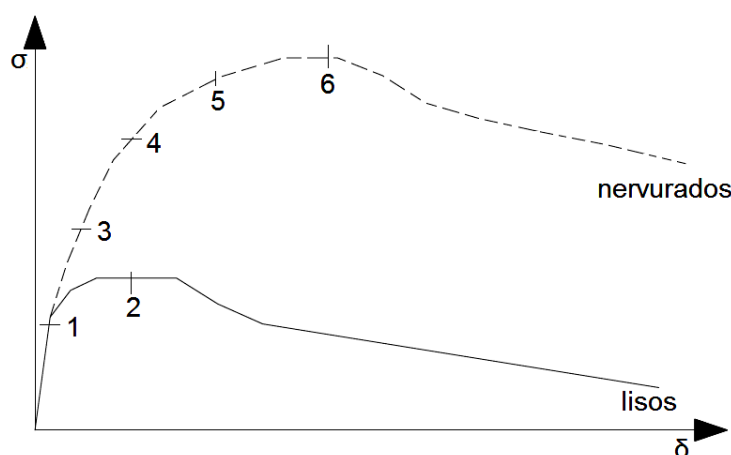


Figura 3.1. Diagrama do comportamento de aderência dos varões lisos e nervurados (adaptado de Leonhardt e Monning, 1977).

Por outro lado, nos varões de alta aderência, depois de romper a adesão química (fase 1) não ocorre a rotura junto ao varão, aparece sim, uma fendilhação transversal do betão devido às tensões tangenciais resultantes do aumento das tensões de tração, (fase 3). A partir deste ponto, os deslocamentos maiores devido à perda de rigidez devido originada pela fendilhação. Com o crescente aumento da tensão, as nervuras dos varões começam a desenvolver elevadas compressões no betão, passando a existir tensões radiais, que provocam uma fendilhação longitudinal no betão e podem mesmo conduzir ao destacamento de algum betão (fase 4 e 5). Se o confinamento existente na peça de betão for suficientemente grande para suportar tensões mais elevadas, passa-se para a fase 6, onde acontece o corte do betão, no sentido das nervuras. Depois desta fase apenas existe o atrito entre os dois materiais, que a pouco e pouco se vai degradando, provocando enormes deslocamentos.

### 3.4 Adesão Química

A adesão química correspondente à primeira parcela da aderência entre aço e betão, deve-se às reações químicas que ocorrem no início de presa do betão. Nesse momento, desenvolvem-se ligações ao nível da interface, entre os dois materiais, criando uma aparente união. Estas reações serão tanto mais elevadas quanto mais a superfície do varão estiver desprovida de impurezas que interfiram nessa ligação (Andrea & Louro, 2011).

Vários autores dão pouca importância a esta parcela, por ser a que das três apresenta uma menor capacidade em termos de resistência, uma vez que este tipo de ligação pode ser perdida pela simples retração do betão, ou nas condições iniciais de serviço. Na Figura 3.2 representam-se as ligações químicas entre os átomos de betão e aço.



Figura 3.2. Ligação química entre os átomos de betão e do aço.

Apesar de, esta ser parcela difícil de medir e quantificar em condições de serviço normais, existe um ensaio isolado simples, que permite medir a resistência da união dos dois materiais. Para tal, betona-se um pequeno cubo sobre uma simples chapa metálica, e posteriormente, com o seu arrancamento verifica-se a capacidade resistente correspondente à adesão química.

Nos últimos anos, foram vários os estudos realizados e inúmeras campanhas experimentais com o intuito de analisar a aderência química (Andrea & Louro, 2011).

### 3.5 Atrito

O atrito é um parâmetro físico amplamente conhecido que, pode ser definido por um coeficiente de atrito, ( $\mu$ ), e que depende da rugosidade superficial de cada material, Figura 3.3. O atrito expressa a oposição que mostram as superfícies de dois corpos em contato ao deslizarem um relativamente ao outro.

Quando transportado para o betão armado, este fenómeno aparece no instante em que a adesão química e a aderência mecânica já foram perdidas. As pressões transversais às armaduras, ou um confinamento do betão, ajudam desenvolver essa interação, atrito, entre as duas superfícies com rugosidades diferentes.

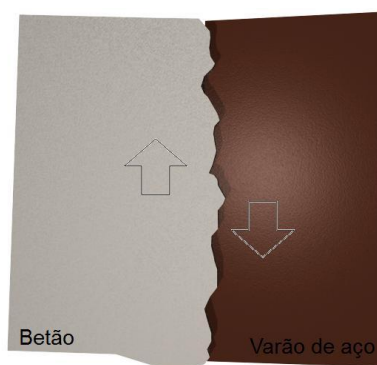


Figura 3.3. Rugosidade e atrito entre as duas superfícies em contato.

Este fenómeno, como já referido depende da rugosidade superficial do material, particularmente importante quando o tipo de varão usado é liso (Andrea & Louro, 2011). Este parâmetro pode ser determinado através do ensaio de arrancamento *Pull Out*, descrito e analisado no Capítulo 4 desta dissertação.

### 3.6 Aderência Mecânica

Esta componente, toma particular interesse quando se utilizam varões nervurados (embora nos varões lisos também possa surgir, devido a imperfeições resultantes do processo de laminação do aço, com valores muito inferiores e quase desprezáveis).

A introdução de pequenas nervuras nos varões de aço, veio permitir mobilizar forças de compressão no betão, perpendiculares às faces das nervuras, resultando num impedimento ao deslizamento. Devido às forças contrárias ao deslocamento que o betão vai impor sobre as nervuras, aparecem microfendas e microesmagamentos nessa zona, como mostra a Figura 3.4:

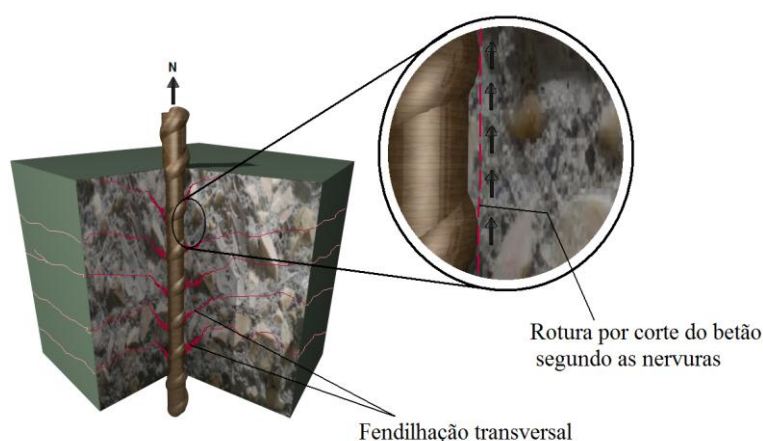


Figura 3.4. Aderência mecânica através das nervuras do varão.

O valor desta componente vai depender do tipo de nervuras, influenciada pela sua: i) forma, ii) largura, iii) inclinação e iv) distância entre elas. Todos estes parâmetros afetam o grau de aderência (Andrea & Louro, 2011).

### 3.7 Fatores que influenciam o comportamento da aderência

Sabe-se que o sucesso do betão armado depende da ligação que se consiga desenvolver entre os seus dois materiais constituintes. Porém, não é de forma linear que se consegue atingir o nível de qualidade esperado, havendo um conjunto de fatores que vão influenciar todo esse processo, umas tendo em conta as ações exteriores aplicadas sobre o betão armado e outras de um ponto de vista das características individuais de cada material (Andrea & Louro, 2011).

Na literatura da especialidade existe vários documentos sobre este assunto. Muitos apontam no sentido de distinguir os fatores relativos ao comportamento local da aderência, dos fatores mais relacionados com o comportamento à resposta global. Os primeiros são orientados pelas

condições básicas de aderência, enquanto os segundos estão dependentes das várias relações com o tipo de confinamento existente no elemento (Andrea & Louro, 2011).

### **3.7.1 Confinamento**

Neste contexto, entende-se por confinamento o fenômeno, pelo qual é criado um anel de betão à volta das armaduras, no qual existem tensões radiais que provocam um aprisionamento das mesmas, não deixando, que deslizem com grande facilidade. Quanto maior for o grau de confinamento, a que estão sujeitas, maior será a capacidade de produzir atrito e maior será a dificuldade para haver destacamento de betão (Louro, 2014).

De forma geral, a comunidade científica considera importante a existência de elevadas tensões de confinamento nas peças de betão armado, conduzindo a ganhos significativos na aderência geral. Exemplos disso são: a existência de uma espessura adequada nos recobrimentos das armaduras das peças e nos nós pilar-viga, o confinamento é conseguido através da contribuição da parte superior do pilar (confinamento ativo) e também pelos varões longitudinais do pilar (confinamento passivo). Em oposição, há um fraco confinamento quando se usa um recobrimento mínimo, pois nestes casos não há betão suficiente para provocar tensões radiais numa ordem de grandeza aceitável (Louro, 2014).

### **3.7.2 Velocidade e duração das cargas**

Segundo os estudos feitos, sobre este tema, por Hjorth (Hjorth, 1976), Tassios (Tassios, 1979) e Eligehausen (Eligehausen, 1983), a aderência aumenta com o aumento da velocidade de aplicação da carga (Louro, 2014).

### **3.7.3 Diâmetro do varão**

É cada vez mais unânime, na comunidade científica, que o diâmetro do varão influencia a aderência. Resultado disso, são as medidas adotadas pelo Eurocódigo 2 (Subcapítulo 8.4.2) onde é exposta a interferência da espessura do varão, no caso da expressão proposta para o cálculo da tensão de rotura da aderência. De um modo geral, a maior eficiência em termos de aderência está associada aos varões que apresentam diâmetros inferiores. Prova disso são estudos que demonstram um decréscimo de aderência, cerca de 10 %, quando se passa de um diâmetro de 19 mm para 25 mm, e a mesma percentagem quando se passa dos diâmetros de 25 mm para os de 31 mm (Louro, 2014).

### **3.7.4 Características do perfil nervurado**

A forma como as nervuras se encontram dispostas no varão, distância e até mesmo altura, desde os estudos de Eligehausen (Eligehausen, 1983) até hoje ainda não é consensual quanto à sua influência na aderência betão-aço. O perfil adequado ou ótimo da nervura pode ainda ser objeto de estudo nesta área. Apesar disto, vários autores contemporâneos justificam que quanto maior for a existência de uma área relativa de nervura, menores serão os

deslizamentos, acabando por ser independente da sua disposição, isto é entre a altura e o espaçamento (Louro, 2014).

### 3.7.5 Resistência do betão

O papel conhecido que o betão desempenha no confinamento da armadura, é desde logo um sinal positivo da sua influência na aderência. Nas zonas entre as nervuras, o betão está sujeito a tensões elevadas, ocorrendo uma enorme fendilhação e esmagamento do mesmo. Posto isto, e tendo por base vários estudos, salienta-se a importância da resistência do betão, ou seja, a aderência aço-betão aumenta com o aumento da resistência do betão (Louro, 2014).

### 3.7.6 Cargas repetidas e número de ciclos

Numa abordagem simplista, a literatura atual, identifica dois tipos de cargas cíclicas, designadas por “*high cycle fatigue*” e “*low cycle fatigue*”. Nesta última, insere-se um fenómeno muito importante para as nossas estruturas atuais que é a influência do sismo. Nestas condições, os vários estudos efetuados, levaram a concluir que a aderência depende em grande parte do deslizamento máximo que ocorre em ambas as direções. (Eligehausen, 1983) (Louro, 2014).

As primeiras conclusões sobre a influência das cargas repetidas e o número de ciclos, apontam para uma redução da tensão de aderência de rotura, bem como a aceleração da velocidade que conduz à deterioração da aderência, cada vez que o número de ciclos aumenta (Eligehausen, 1983).

### 3.7.7 Cedência das armaduras

A cedência das armaduras pode ter alguma influência na aderência, dependendo da forma como a peça estiver a ser solicitada. Foi observado, por vários autores, que a aderência entre aço e betão diminui quando o aço era solicitado à tração. Pelo contrário, quando se colocava o aço à compressão a aderência era aumentada. Esta diferença de resultados foi justificada por Lowes, como sendo o efeito de *Poisson*. Quando o varão era solicitado à tração a secção do varão logicamente diminuía, levando a que o escorregamento se desse de uma forma mais rápida. Em oposição, quando sujeito à compressão a secção do varão engrossava dificultando o seu escorregamento (Louro, 2014).

## 3.8 Mecanismo de fendilhação

A fendilhação no panorama atual de conhecimento sobre o betão armado é um parâmetro indispensável a ter em conta, devendo ser encarada como um fenómeno natural. O comportamento deste fenómeno está hoje bem caracterizado quanto à sua explicação e controlo, contudo é bem conhecida a dificuldade em quantificar alguns dos parâmetros intervenientes em todo este processo.

A forma mais fácil de estudar a fendilhação e a deformação em elementos de betão armado é analisar o comportamento de tirantes quando solicitados a uma força axial de tração (tração pura) (Vieira, 2011).

No geral, o comportamento dos tirantes de betão armado, ao longo do processo de carga, pode atingir dois estados antes da rotura (estado I e estado II). O primeiro estado, correspondente ao estado I é representativo do regime elástico (ver Figura 3.5). Este estado, também é denominado por estado não fendilhado, pois as tensões aplicadas são inferiores à capacidade resistente do betão à tração ( $f_{ctm}$ ) e a deformação não é elevada (Vieira, 2011).

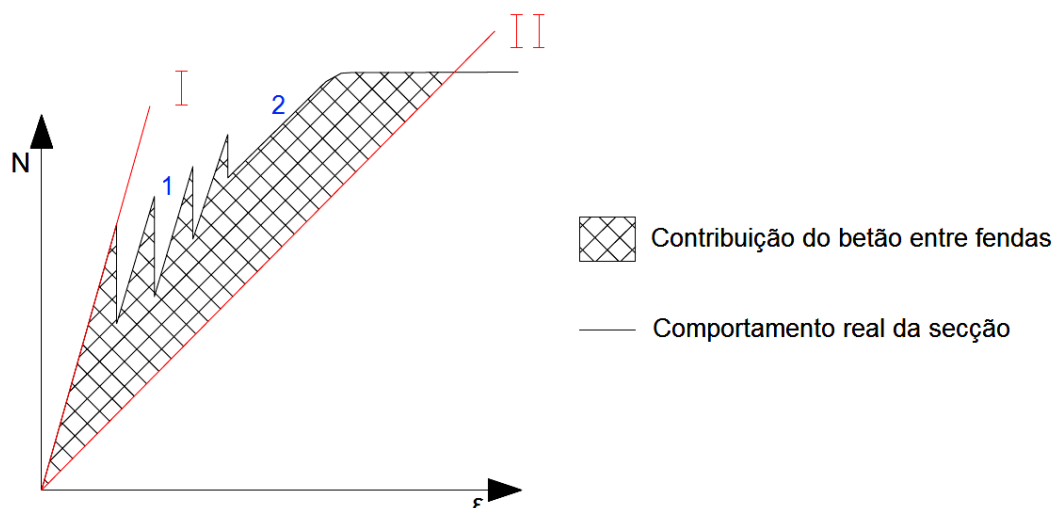


Figura 3.5. Comportamento de um tirante de betão armado, relativo à fendilhação entre os estados I e II (adaptado de Vieira, 2011).

À medida que a carga vai crescendo, aparece a 1ª fenda uma vez atingido o valor máximo de resistência do betão. Dá-se então, o fim do estado I e o início do estado II (estado fendilhado), podendo neste novo estado distinguir-se duas fases. Uma relativamente ao período de formação das fendas (número 1 no gráfico) e posterior a isso a fase de estabilização das fendas (número 2 no gráfico). É de referir que o estado II, normalmente inicia-se com valores de extensão relativamente baixos (Vieira, 2011).

Na fase de formação de fendas, à medida que o esforço no tirante aumenta também aumenta a largura das fendas e o número de novas fendas, desde que exista uma armadura longitudinal mínima que seja suficiente para que não comece a plastificar. Caso isto aconteça, não há formação de mais fendas (esta temática será explicada com mais pormenor no subcapítulo 3.8.1.). Nesta fase, salienta-se, que em paralelo com o progressivo aumento da fendilhação há uma diminuição progressiva da rigidez (Vieira, 2011). Atingido o limite de formação de novas fendas, o comportamento geral do tirante volta a ser praticamente linear. A extensão da armadura aumenta proporcionalmente com o aumento da força aplicada, levando ao aumento progressivo da largura das fendas já existentes.

No final de todo este processo, é atingido o patamar de cedência da armadura, definido pelo valor limite de elasticidade do aço. Posteriormente há um aumento das deformações até que se atinja o valor máximo de resistência do varão (Vieira, 2011).

De acordo com os estudos realizados, este mecanismo pode ser analisado em termos físicos e analíticos da seguinte forma (Figura 3.6):

Considerando novamente a tração pura numa peça de betão com as seguintes características,

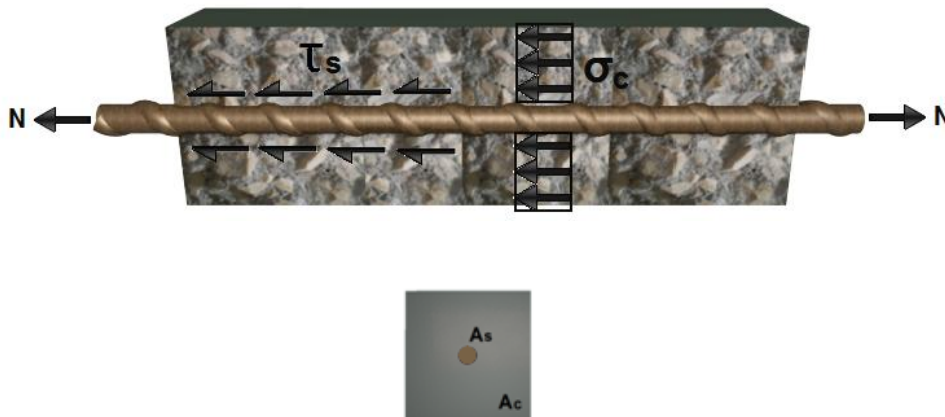


Figura 3.6. Distribuição das tensões dentro do betão armado no estado I (adaptação Marchão, 2007).

Onde:

$\sigma_c$  – tensão no betão ;  $\sigma_s$  – tensão no aço;  $A_s$  – Área de aço;  $A_c$  – Área de betão

Até ao aparecimento da primeira fenda, as tensões de tração são suportadas pelo betão e pelo aço, contudo, isto muda quando,  $\sigma_c = f_{ctm}$ . Neste caso, o betão, na zona onde foi atingido esse valor fendilha, ficando as cargas nessa zona suportadas unicamente pela armadura, aumentando assim de forma abrupta a sua tensão e extensão.

Antes da fendilhação a tensão no betão sabe-se pela expressão:

$$\sigma_c = \frac{N}{A_c} \quad (3.1)$$

Nesta fase, estado I, para determinar a tensão no aço usa-se as seguintes expressões:

$$\sigma_c = \varepsilon_c \cdot E_c \quad ; \quad \sigma_s = \varepsilon_s \cdot E_s$$

$$\text{como,} \quad \varepsilon_s = \varepsilon_c \rightarrow \frac{\sigma_s}{\sigma_c} = \frac{E_s}{E_c} \Leftrightarrow \sigma_s = \frac{E_s}{E_c} \cdot \sigma_c \Leftrightarrow \sigma_s = \alpha \cdot \sigma_c$$



Após a peça de betão passar para o estado fendilhado, estado II, o betão já não influencia a resistência naquela zona, e a tensão no aço é dada por:

$$\sigma_s = \frac{N}{A_s} \quad (3.2)$$

Com o objetivo de o aço não entrar imediatamente em cedência após a abertura da fenda (aumento elevado de tensão de forma repentina) deve ser definido uma armadura longitudinal mínima. Com este aumento súbito de tensão, a extensão no aço ( $\varepsilon_s$ ) também pode aumentar muito e consequentemente originar uma largura excessiva de fendas.

No interior do betão, na zona adjacente à abertura da fenda, a distribuição de tensões normais passa a ser diferente, como mostra a Figura 3.7.

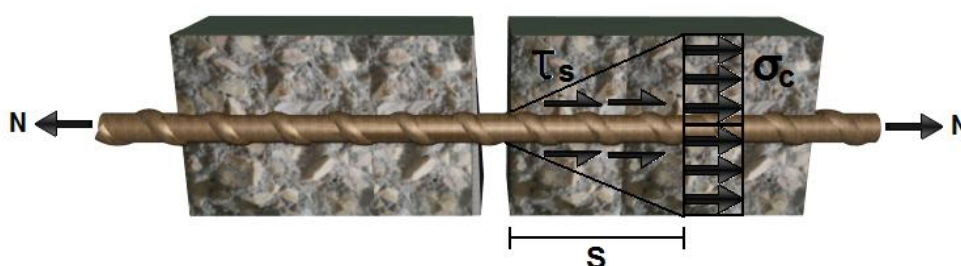


Figura 3.7. Distribuição das tensões dentro do betão armado depois da fendilhação (adaptação Marchão, 2007).

Quando as tensões na secção de betão atingirem a tensão  $\sigma_c = f_{ctm}$ , ocorre novamente o aparecimento de uma nova fenda, repetindo-se este processo até ser atingida a estabilização do aparecimento de fendas.

Na Figura 3.8, é possível verificar que a tensão na armadura vai aumentando cada vez que se aproxima da fenda. Em sentido oposto, a tensão no betão vai diminuindo, uma vez que na própria fenda o betão tem uma tensão igual a zero. Na localização das fendas a aderência aí existente é nula, havendo apenas mobilização das tensões de aderência nas proximidades das fendas.

As extensões nos dois materiais seguem a mesma tendência das tensões, havendo um aumento da extensão na armadura na aproximação de uma fenda. Entre as fendas o betão demonstra algum contributo, ajudando a resistir às tensões de tração, de uma forma conjunta com a armadura. Na aproximação a uma fenda a extensão no betão tende para zero.

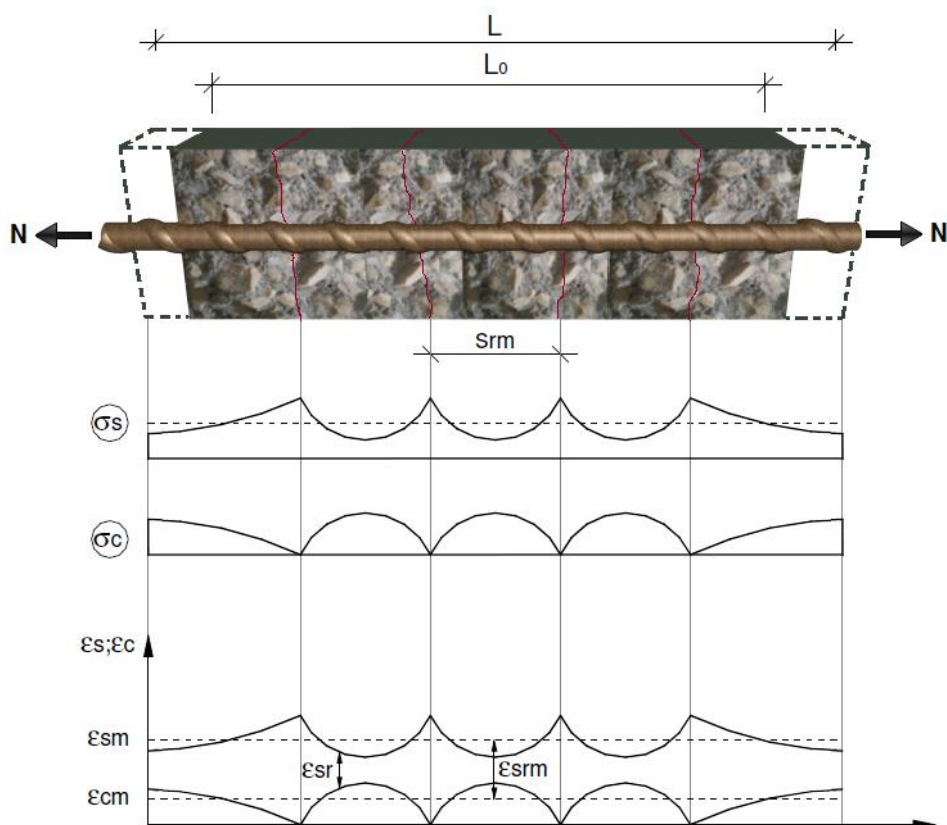


Figura 3.8. Diagramas de tensão- extensão do aço e do betão durante a fendilhação (adaptação Marchão, 2007).

### 3.8.1 Plastificação da armadura

O principal critério que justifica e define o uso de armadura mínima, em qualquer estrutura de betão armado, é o de que a armadura não plastifique para o esforço de fendilhação da peça.

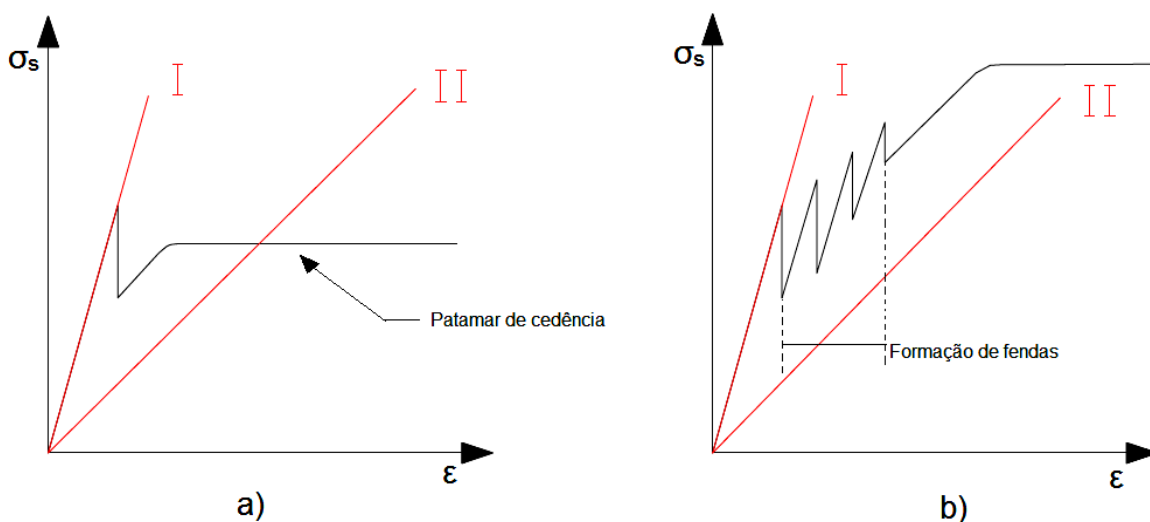


Figura 3.9. Gráficos tensão- deslocamento para a) Plastificação de armadura, b) Fendilhação normal (adaptação Vieira, 2011).

Assim, ao assegurar que o esforço de cedência da armadura é superior ao esforço de formação de fendilhação, está-se, de certo modo, não só a permitir que a estrutura ganhe uma ductilidade mínima, possibilitando a salvaguarda de que a rotura do betão não se dê de forma frágil, mas ainda a impedir o aparecimento de uma fenda isolada.

Na Figura 3.9 é possível observar o comportamento de um tirante quando sujeito a uma carga imposta de tração. No primeiro caso, a resistência da armadura é inferior à força de fendilhação, acabando assim, por a armadura plastificar e abrindo uma única fenda.

No segundo caso, acontece o oposto, a armadura já tem capacidade para resistir a força superior à carga de fendilhação, ocorrendo assim todo o processo de formação de fendas. Nesta situação o processo de formação de fendas é realizado de forma controlada (Vieira, 2011). A introdução de uma armadura mínima visa assim evitar a ocorrência de uma rotura frágil e o aparecimento de uma única fenda com largura elevada.

O EC2 (subcapítulo 7.3.2, expressão 7.1) prevê o uso de armadura mínima para controlo de fendilhação através da expressão:

$$A_{s,min}\sigma_s = K_c K f_{ct,eff} A_{ct} \quad (3.3)$$

Onde:

$A_{s,min}$  – área mínima das armaduras para betão armado na zona tracionada;

$A_{ct}$  – área de betão tracionado. A zona de betão tracionado é aquela em que, pelo cálculo da secção, se demonstra que está em tração imediatamente antes da formação da 1ª fenda;

$\sigma_s$  – valor absoluto da tensão máxima admissível na armadura imediatamente depois da formação da fenda. Poderá ser considerada igual à tensão de cedência da armadura,  $f_{yk}$ . No entanto, poderá ser necessário adotar-se um valor mais baixo para satisfazer a largura máxima de fendas em função do diâmetro máximo ou do espaçamento máximo entre varões;

$f_{ct,eff}$  – valor médio da resistência do betão à tração à data em que se prevê que se possam formar as primeiras fendas,  $f_{ct,eff} = f_{ctm}$ ;

$K$  – coeficiente que considera o efeito das tensões não uniformes autoequilibradas, de que resulta uma redução dos esforços de coação:

= 1,0 para almas com  $h \leq 300 \text{ mm}$  ou para banzos com larguras inferiores a  $300 \text{ mm}$ ;

= 0,65 para almas com  $h \geq 800 \text{ mm}$  ou para banzos com larguras superiores a  $800 \text{ mm}$ ;

$K_c$  – coeficiente que tem em conta a distribuição de tensões na secção, imediatamente antes da fendilhação e da variação do braço do binário:

= 1,0 para tração simples;

= 0,4 para flexão.

### 3.9 Modelos teóricos

#### 3.9.1 Tension Stiffening Effect

Designado na literatura atual como, *Tension Stiffening Effect*, este fenómeno caracteriza-se pelo contributo que o betão pode dar entre as fendas, nomeadamente, o aumento de rigidez (Figura 3.10). Devido à interação que existe entre a armadura e o betão, o betão entre fendas também resiste a tensões de tração (Bento, 2013).

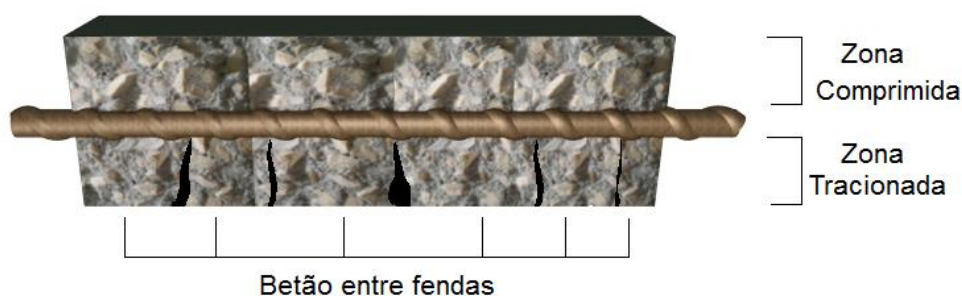


Figura 3.10. Contributo do betão entre fendas (adaptação Bento, 2013).

Este fenómeno, *Tension Stiffening Effect*, é afetado por vários parâmetros, provenientes tanto do aço como do betão, ou até mesmo da interação entre ambos. Dos vários parâmetros destaca-se: i) resistência à tração do betão, ii) módulo de elasticidade do betão, iii) módulo de elasticidade da armadura, iv) a aderência na interface betão-aço e v) número de carregamentos.

Devido à importância deste fenómeno no cálculo das deformações de estruturas de betão armado, os regulamentos mais importantes apresentam expressões onde o *Tension Stiffening Effect* é considerado, são exemplo disso o EUROCÓDIGO 2 (EC2), *Model Code 90 (MC90)* e o *ACI 224.2R-92*.

#### 3.9.2 Eurocódigo 2

De acordo com o EC2, particularmente no subcapítulo 7.4.3, é possível fazer o cálculo rigoroso quanto à extensão média ( $\epsilon_{sm}$ ) da armadura bem como a deformação inerente aos elementos de betão armado.

Este cálculo é possível através da seguinte expressão:

$$\alpha = \zeta \alpha_{II} + (1 - \zeta) \alpha_I \quad (3.4)$$

onde:

$\alpha$  – parâmetro de deformação considerando que poderá ser, por exemplo, uma extensão, uma curvatura ou uma rotação;

$\alpha_i, \alpha_{ii}$  – valores do parâmetro calculado, respetivamente, para o estado não fendilhado e totalmente fendilhado;

$\zeta$  – coeficiente de distribuição (que tem em conta a contribuição do betão tracionado entre fendas) obtido pela expressão (subcapítulo 7.19 do EC2):

$$\zeta = 1 - \beta(\sigma_{sr} / \sigma_s)^2 \quad (3.5)$$

onde:

$\zeta = 0$  – para secções não fendilhadas;

$\beta$  – coeficiente que tem em conta a influência na extensão média da duração do carregamento ou da repetição do carregamento:

= 1,0 para um carregamento de curta duração;

= 0,5 para um carregamento de longa duração ou para carregamentos repetidos;

$\sigma_s$  – tensão nas armaduras de tração, calculada na hipótese de secção fendilhada;

$\sigma_{sr}$  – tensão nas armaduras de tração, calculada na hipótese de secção fendilhada sujeita às condições de carregamento que provocam o início da fendilhação.

Quando se faz uma análise sobre esforços de tração é importante e possível, através do EC2, efetuar o cálculo direto relativamente à largura das fendas ( $W$ ) que se formam e a distância entre fendas ( $S_{r,máx}$ ).

Assim, através da expressão seguinte (subcapítulo 7.8 do EC2), é possível calcular a largura das fendas:

$$W_k = S_{r,max}(\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}) \quad (3.6)$$

onde:

$S_{r,máx}$  – distância máxima entre fendas;

$\epsilon_{sm}$  – extensão média da armadura para a combinação de ações considerada, incluindo o efeito das deformações impostas e considerando a contribuição do betão tracionado. Considera-se apenas a extensão de tração que ocorre para além do estado de extensão nula do betão no mesmo nível;

$\epsilon_{cm}$  – extensão média no betão entre fendas;

O parâmetro ( $\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}$ ), poderá ser calculado pela expressão (subcapítulo 7.9 do EC2):

$$\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - K_t \left( \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} \right) (1 + \alpha_e \rho_{p,eff})}{E_s} \geq 0,6 \sigma_s / E_s \quad (3.7)$$

onde:

$\sigma_s$  – tensão na armadura de tração admitindo a secção fendilhada. Para elementos pré esforçados por pré-tensão,  $\sigma_s$  poderá ser substituído pela variação  $\Delta\sigma_p$  de tensões nas armaduras de pré-esforço a partir do estado de extensão nula do betão no mesmo nível;

$\alpha_e$  – relação  $E_s/E_c$ ;

$\rho_{p,eff}$  – taxa de armadura de tração em relação ao betão tracionado;

$A_{c,eff}$  – área efetiva de betão mobilizado por aderência;

$k_t$  – coeficiente em função da duração do carregamento:

$k_t = 0,6$  para ações de curta duração;

$k_t = 0,4$  para ações de longa duração.

O último parâmetro para se conseguir fazer o cálculo da largura das fendas,  $S_{r,max}$ , pode ser calculado através da expressão:

$$S_{r,max} = K_3 c + K_1 K_2 K_4 \phi / \rho_{p,eff} \quad (3.8)$$

em que:

$\phi$  – diâmetro dos varões;

$K_1$  – coeficiente que tem em conta as propriedades de aderência das armaduras aderentes:

= 0,8 para varões de alta resistência;

= 1,6 para armaduras com uma superfície efetivamente lisa (por exemplo, armaduras de pré-esforço);

$K_2$  – coeficiente que tem em conta a distribuição das extensões:

= 0,5 para flexão;

= 1,0 para tração simples;

$K_3 = 3,4$  (pelo Anexo Nacional) ;

$K_4 = 0,425$  (pelo Anexo Nacional).

Como finalização de informação sobre o EC2, há ainda a salientar a expressão que traduz a tensão de cálculo de aderência para o betão armado. No subcapítulo 8.4.2. do EC2, a tensão de aderência pode ser calculada através da seguinte expressão:

$$f_{bd} = 2,25 \eta_1 \eta_2 f_{ctd} \quad (3.9)$$

onde:

$f_{ctd}$  – valor de cálculo da resistência à tração do betão;

$\eta_1$  – coeficiente que relaciona as condições de aderência e a disposição do varão;

$\eta_2$  – dado em função do diâmetro.

### 3.9.3 Model Code 1990

O conhecimento sobre os regulamentos existentes é essencial. Embora nesta dissertação apenas se tenha usado o EC2 na análise de resultados, decidiu-se apresentar dois regulamentos igualmente importantes, o MC90 e o ACI 224.2R-92.

A abordagem que o MC90 apresenta sobre esta temática está descrita na Secção 3.2. Começa-se por calcular a extensão média e a deformação existente, através de:

- i. Para o estado não fendilhado,  $0 < \sigma_s \leq \sigma_{sr1}$

$$\varepsilon_{sm} = \varepsilon_{s1} \quad (3.10)$$

- ii. Fase da fendilhação,  $\sigma_{sr1} < \sigma_s \leq \sigma_{srn}$

$$\varepsilon_{sm} = \varepsilon_{s2} - \frac{\beta_t(\sigma_s - \sigma_{sr1}) + (\sigma_{srn} - \sigma_s)}{\sigma_{srn} - \sigma_{sr1}} (\varepsilon_{sr2} - \varepsilon_{sr1}) \quad (3.11)$$

- iii. Fendilhação estabilizada,  $\sigma_{srn} < \sigma_s \leq f_{yk}$

$$\varepsilon_{sm} = \varepsilon_{s2} - \beta_t(\varepsilon_{sr2} - \varepsilon_{sr1}) \quad (3.12)$$

- iv. Fase pós cedência,  $f_{yk} < \sigma_s \leq f_{tk}$

$$\varepsilon_{sm} = \varepsilon_{sy} - \beta_t(\varepsilon_{sr2} - \varepsilon_{sr1}) + \delta(1 - \frac{\sigma_{sr1}}{f_{yk}})(\varepsilon_{sr2} - \varepsilon_{sy}) \quad (3.13)$$

onde:

$\varepsilon_{sm}$  – extensão média da armadura;

$\varepsilon_{s1}$  – extensão da armadura quando o betão não está fendilhado;

$\varepsilon_{s2}$  – extensão da armadura numa secção fendilhada;

$\varepsilon_{sr1}$  – extensão da armadura quando se forma a 1ª fenda (considerando a contribuição do betão);

$\varepsilon_{sr2}$  – extensão da armadura numa secção fendilhada sob a ação das forças que originam a 1ª fenda;

$\Delta \varepsilon_{sr}$  – diferença entre  $\varepsilon_{sr2}$  e  $\varepsilon_{sr1}$ ;

$\beta_t$  – fator que traduz a percentagem de betão fendilhado. Este fator está relacionado com o espaçamento das fendas (aderência), com o tipo de esforço e com o tipo de cargas. Para ações de curta duração (tração pura),  $\beta_t = 0,40$ , para ações de longa duração ou cargas repetidas (tração pura),  $\beta_t = 0,25$ ;

$\varepsilon_{sy}$  – extensão de cedência da armadura;

$\varepsilon_{su}$  – extensão de rotura da armadura;

$\varepsilon_{smu}$  – extensão média da armadura no instante da rotura;

$\sigma_s$  – tensão da armadura numa secção fendilhada;

$\sigma_{sr1}$  – tensão da armadura quando se forma a 1ª fenda (considerando a contribuição do betão);

$\sigma_{sm}$  – tensão da armadura no fim da estabilização da fendilhação, quando se forma a última fenda (considerando a contribuição do betão);

$f_{yk}$  – tensão característica de cedência da armadura;

$f_{ik}$  – tensão característica de rotura da armadura;

$\delta = 0,8$  para aço dúctil e com  $f_{yk}=500 \text{ MPa}$ ; este coeficiente depende da relação  $f_{ik}/f_{yk}$  e de  $f_{yk}$ .

No MC90, também o efeito do *Tension Stiffening Effect* é considerado através do coeficiente,  $\beta_t$ . Este coeficiente traduz a percentagem de betão não fendilhado, onde se pode avaliar a contribuição do betão. Este modelo indica que para ações de curta duração e em tração pura, o valor deste coeficiente deverá ser  $\beta_t = 0,40$ , enquanto para ações repetidas o valor deverá ser menor, aproximadamente  $\beta_t = 0,25$ .

#### 3.9.4 ACI 224.2R-92

Como informação final sobre os modelos regulamentares existentes, relativamente às deformações e extensões que um tirante de betão armado, apresenta-se ainda o regulamento americano ACI 224.2R-92. Este regulamento prevê o cálculo das deformações em betão armado através da seguinte expressão:

$$A_e = A_g(P_{cr}/P)^3 + A_{cr}(1 - (P_{cr}/P)^3) \quad (3.14)$$

onde:

$A_e$  – área efetiva da secção de betão;

$A_{cr}$  – área da secção fendilhada;



$A_g$  – área total da secção incluindo a área homogeneizada da armadura;

$P_{cr}$  – força para a qual ocorre a primeira fenda;

$P$  – força aplicada.



## 4. PROGRAMA EXPERIMENTAL

### 4.1 Introdução

A adição de nanopartículas à composição do betão tem como objetivo melhorar as suas propriedades e poderá, eventualmente, catapultar o betão armado para uma nova fase de evolução. Neste sentido, terá de ser testada e estudada a forma como estes betões influenciarão a aderência. Nesta dissertação, como foi descrito anteriormente, o principal objetivo, é identificar e perceber as alterações no comportamento de tirantes de betão armado resultantes da introdução de nanopartículas e de fibras metálicas.

Neste capítulo, será descrito todo o processo experimental envolvido na realização deste estudo: não só as características dos materiais usados, na criação das peças de betão, como todos os procedimentos necessários à realização dos ensaios, *Pull Out* e de tração dos tirantes.

Foram produzidas 8 misturas diferentes de betão, que posteriormente foram combinadas com varões lisos e nervurados. Foram produzidos e testados 32 provetes para o ensaio *Pull Out*, com duas amostras por cada tipo de varão, 16 com varões nervurados e 16 com varões lisos. Relativamente aos ensaios de tração de tirantes foram produzidos 16 provetes, com apenas uma amostra por mistura e por tipo de varão, 8 varões nervurados e 8 varões lisos.

### 4.2 Caracterização dos provetes para os ensaios *Pull Out*

Para os ensaios de *Pull Out*, como referido, foram produzidos 32 provetes, tendo como referência a norma EN 10080, mas apenas ao nível das dimensões do provete. Isto porque esta norma estabelece critérios para provetes cúbicos e para uma betonagem perpendicular à direção do varão, algo que não foi feito nesta dissertação. Foi estabelecido, inicialmente que o provete de betão seria na forma cilíndrica, com um diâmetro de 10 cm e uma altura de 20 cm.

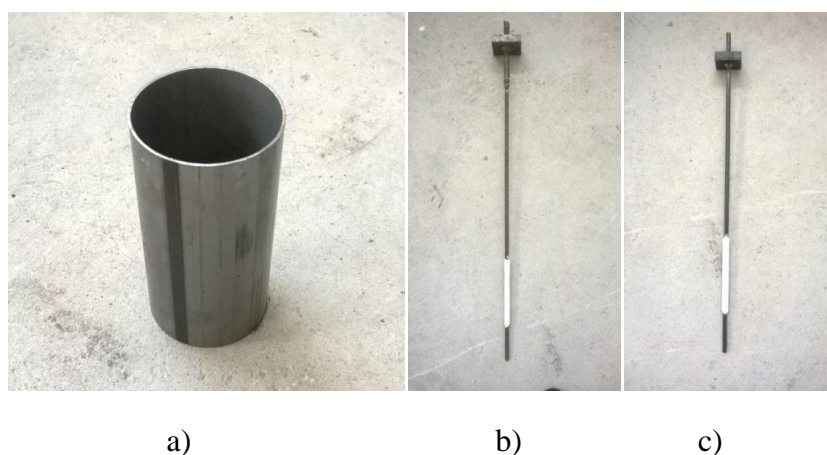


Figura 4.1. Material usado para ensaios *Pull Out*: a) Cilindro metálico (cofragem); b) varão nervurado; c) Varão liso.

Definiu-se que esta forma do provete utilizado daria um bom confinamento, utilizando para esse efeito um cilindro metálico (cofragem perdida). O intuito era obter o ponto de tensão de aderência máxima, descartando o risco do provete romper pelo betão antes de atingir esse ponto.

Os varões utilizados foram de diâmetro  $\phi 10$ , em ambos os tipos de varões (lisos e nervurados). Na Figura 4.1 mostra-se os elementos metálicos que constituíam os provetes.

Para que existisse um perfeito equilíbrio dos varões e para que fosse possível fazer passar os varões exatamente no centro dos provetes, e assegurar as dimensões adotadas, foi necessária a construção de uma pequena estrutura de madeira capaz de assegurar todas estas exigências, como mostra a Figura 4.2:

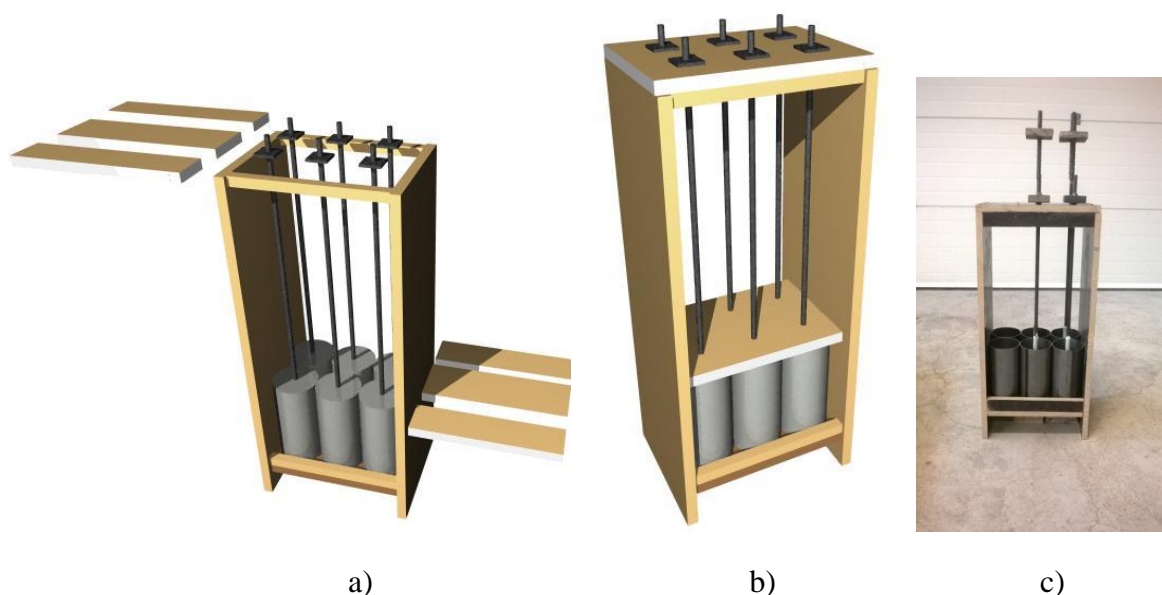


Figura 4.2. Estrutura de montagem do ensaio *Pull Out* para betonagem: a) projeto 3D da estrutura com os seus elementos; b) Projeto 3D da estrutura montada; c) Estrutura real em utilização.

O ensaio *Pull Out* consiste no arrancamento de um varão existente num provete de betão. Para exercer a força de tração na extremidade do varão colocou-se uma chapa soldada na parte superior do varão que serviu de ancoragem no aparelho onde vai ser exercida a força de arrancamento. A força de tração imposta sobre o provete foi aplicada até as forças de aderência serem perdidas. Registou-se a força máxima atingida no arrancamento que, posteriormente, torna possível o cálculo da tensão máxima.

As dimensões e esquematização adotadas para execução dos provetes para o ensaio *Pull Out* são apresentadas na Figura 4.3, numeradas de 1 a 8:

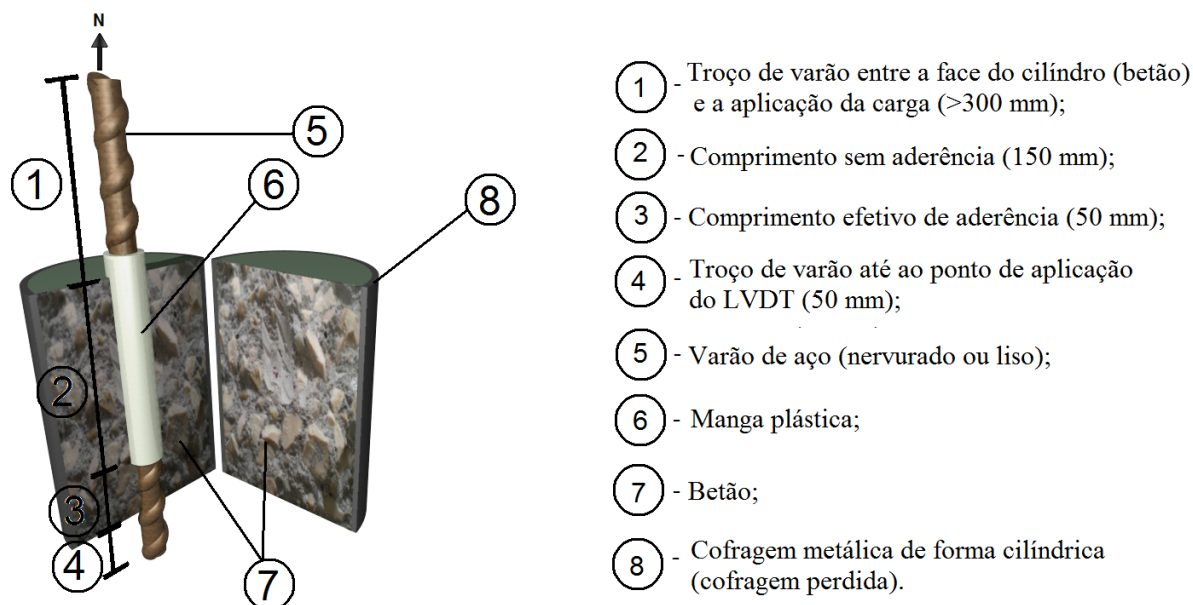


Figura 4.3. Esquema sobre as dimensões e os elementos constituintes do provete para ensaio *Pull Out*.

### 4.3 Caracterização dos tirantes de betão armado

Relativamente aos tirantes, produziram-se 16 provetes com dimensões de  $75 \times 75 \times 1200 \text{ mm}^3$ . Estas medidas foram estudadas e ponderadas por forma a permitir obter a abertura de todas as fendas antes de o varão entrar em cedência, uma vez que uma gama dos betões utilizados (betão de alta resistência) apresentava uma tensão elevada na abertura da primeira fenda. Na Figura 4.4, apresenta-se os elementos para produção dos tirantes.

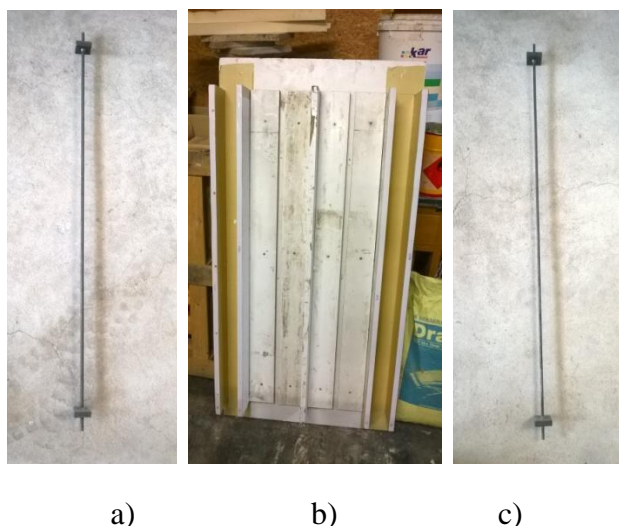


Figura 4.4. Material usado e cofragem para ensaios tirantes. a) Varão nervurado; b) Cofragem; c) Varão liso.

Para a realização dos ensaios, foi produzida uma cofragem com as dimensões pretendidas para o tirante. Incorporou-se um sistema de fixação dos varões para a betonagem, com os

devidos espaçamentos, garantindo o posicionamento central deste no provete, o que é difícil de garantir com a betonagem e vibração.

A constituição dos tirantes resume-se à existência de apenas um varão (nervurado ou liso) que atravessa todo o elemento de betão. Nestes varões também foram utilizadas chapas metálicas em cada extremidade (ver Figura 4.5), usadas para ancorar o varão no aparelho que exerce a força de tração.

O ensaio do tirante baseia-se na incrementação de um deslocamento a uma velocidade reduzida,  $0,02 \text{ mm/s}$ , que corresponde à aplicação de uma força de tração no varão, que é transmitida a todo o provete. Consequentemente, irão aparecer fendas ao longo do tirante. Os resultados registados foram: i) largura de fendas; ii) espaçamento entre elas; iii) força aplicada e iv) deformação do tirante. Na Figura 4.5, apresenta-se o esquema do tirante:

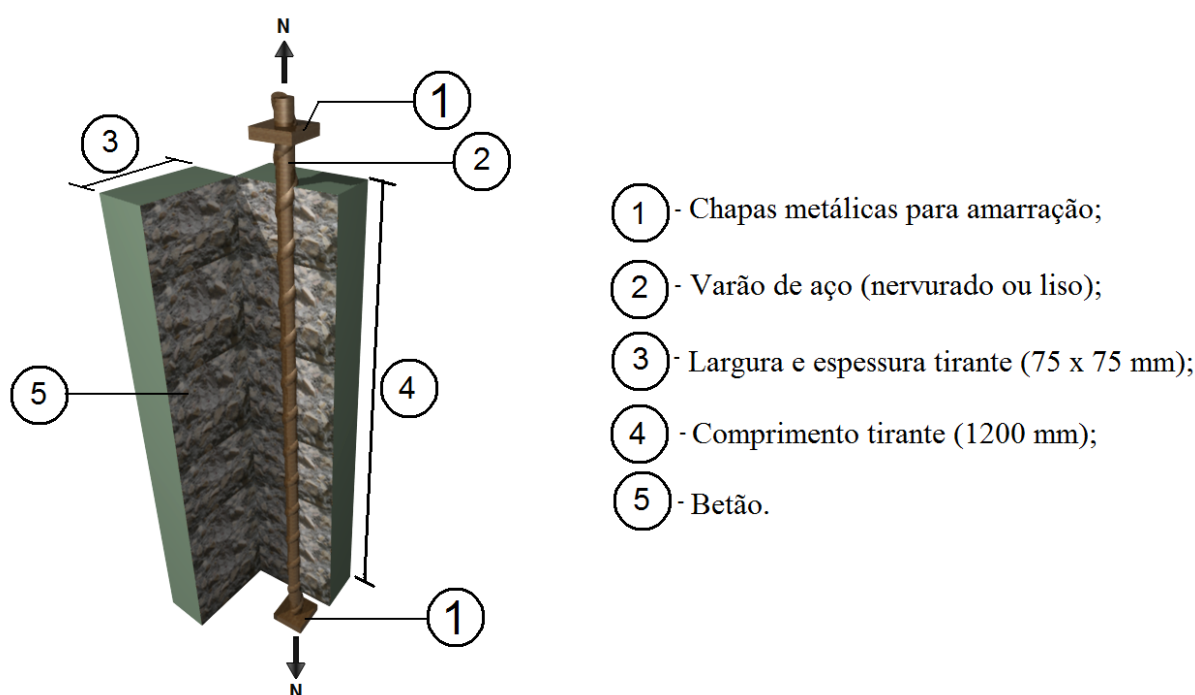


Figura 4.5. Esquema sobre as dimensões e os elementos constituintes do provete para o ensaio de tirante.

#### 4.4 Caracterização das misturas de betão

Durante a realização deste trabalho laboratorial foi necessário realizar uma série de escolhas para se estudar efeito provocado pela introdução das nanopartículas em misturas de betão. Tendo por base estudos realizados com o tipo de nanopartículas que foram usadas nesta dissertação (Soldado *et al*, 2015), (Lourenço *et al*, 2015), a escolha relativamente ao tipo de betão recaiu sobre duas classes que demonstraram ter melhores resultados. Estas foram designadas (como referido no Capítulo I) por CA350 ( $230 \text{ kg/m}^3$  de cimento mais  $120 \text{ kg/m}^3$

de fíler calcário) e CA550 ( $350 \text{ kg/m}^3$  de cimento), de acordo com a dosagem de cimento usado e, apresentando valores de resistência menores e maiores, respetivamente.

## 4.5 Materiais

### 4.5.1 Betão e seus constituintes

#### (i) Ligante e adições

A produção do betão incluiu a utilização como ligante, um cimento do tipo CEM I 52,5 R da **Secil**, caracterizando-se por ter uma massa volúmica de  $3,16 \text{ kg/dm}^3$ , valor obtido pelo ensaio experimental com o densímetro de *Le Chatelier*.

Em três das oito misturas produzidas, isto é, as de menor resistência (CA350), foi ainda introduzido como adição Fíler calcário com o intuito de alterar o efeito pretendido a nível de resistência mecânica final, mas também com a finalidade de melhorar a qualidade, apresentando uma massa volúmica de  $2,70 \text{ kg/dm}^3$ . Na Figura 4.6, mostra-se o aspeto destes materiais.

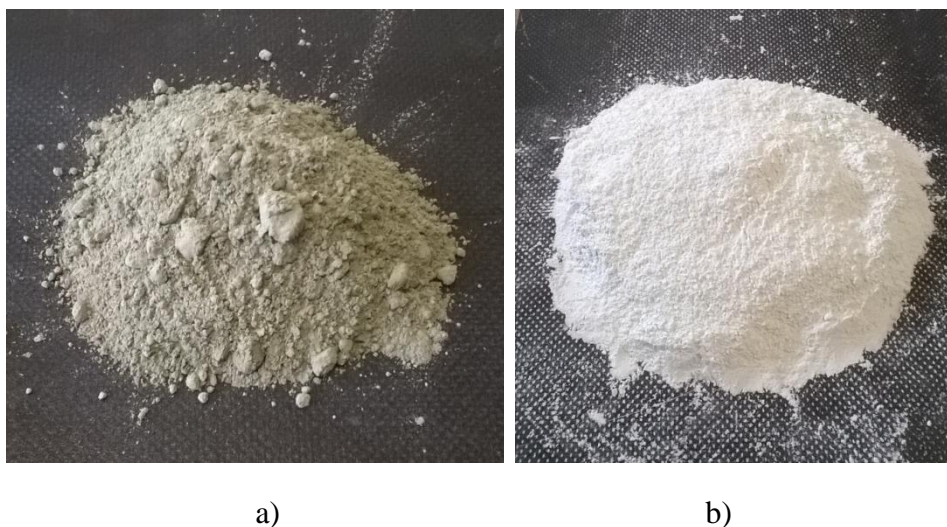


Figura 4.6. Ligantes e adições usadas: a) Cimento Portland; b) Fíler Calcário.

#### (i) Nanopartículas

Uma das razões que justificou o interesse da realização deste trabalho experimental, foi a introdução de nanopartículas no betão armado. As nanopartículas escolhidas foram as nano- $\text{SiO}_2$  e nano- $\text{Al}_2\text{O}_3$ , por serem estas que, em ensaios preliminares, efetuados no âmbito de um trabalho de investigação (Soldado *et al*, 2015), (Lourenço *et al*, 2015), realizado no mesmo laboratório, mostraram ter os melhores resultados.

Este material foi produzido pela empresa **SMART INOVATION**, através do seu processo de síntese, e em ambos os tipos de nanopartículas, foi usado o procedimento de filtração e



secagem em estufa para serem enviadas em estado sólido. As massas volúmicas deste material foram, no caso da nano-SiO<sub>2</sub>, de 2,22 kg/dm<sup>3</sup>, no caso das nanopartículas de nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, a massa volúmica foi mais elevada, 3,95 kg/dm<sup>3</sup>. Na Figura 4.7, apresentam-se imagens CEM, fornecidas pela empresa **SMART INOVATION**.

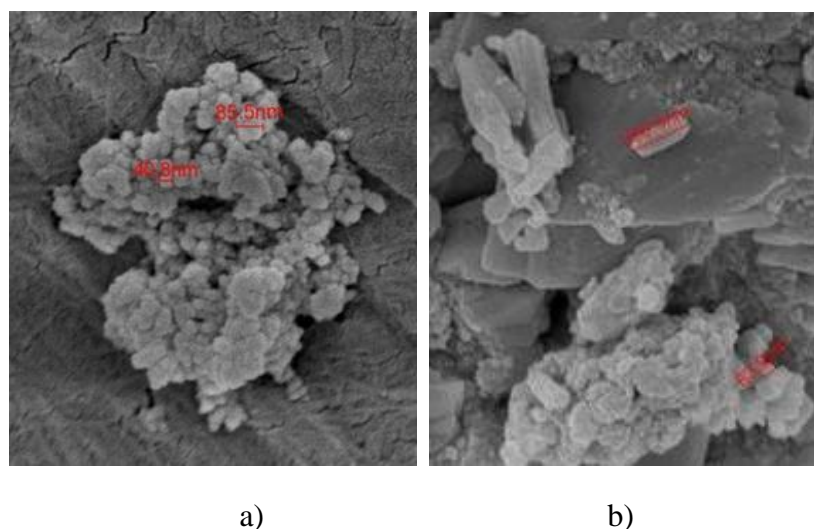


Figura 4.7. Imagens CEM das nanopartículas: a) Nanopartícula de sílica (nano-SiO<sub>2</sub>); b) Nanopartícula de alumínio (nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) (cedidas pela empresa Smart Inovation, 2015).

A introdução deste material no betão, foi por substituição de parte do cimento, numa percentagem de 2% (Lourenço *et al*, 2015).

Salienta-se que para o manuseamento das nanopartículas, por ainda não se saber se terá algum risco para a saúde humana, tornou necessário o uso de máscaras e luvas, prevenindo a inalação destas partículas de tamanho muito reduzido.

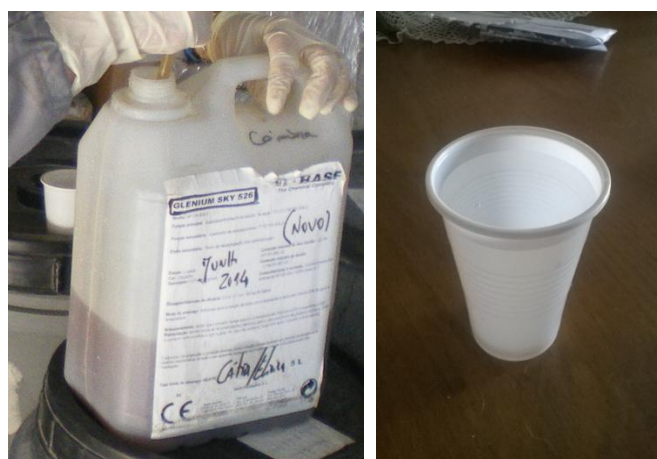
(i) Adjuvante e água

Com o intuito de reduzir a quantidade de água necessária à mistura, para assegurar uma resistência adequada ao betão, mantendo simultaneamente uma trabalhabilidade elevada, utilizou-se um adjuvante. Este adjuvante, designado por **Glenium SKY 526**, é um superplastificante de terceira geração, à base de policarboxilatos, e tem por função: i) repulsão eletrostática entre partículas; ii) as moléculas de adjuvante atuam como barreiras entre as partículas de cimento: repulsão estérica; iii) a dispersão dos grãos de cimentos previne a formação de grandes flocos de cimento; iv) a trabalhabilidade melhora bastante; v) redução de água até 40%.

Toda a água necessária para o processo proveio da rede pública de abastecimento, servindo perfeitamente para a produção do betão (Costa, 2007).

Na Figura 4.8, apresentam-se imagens do adjuvante e da água.





a)

b)

Figura 4.8. Material líquido usado na mistura: a) Adjuvante; b) Água.

(i) Agregados

Na constituição da estrutura do betão, foram considerados vários tipos de agregados, apresentando uma granulometria de vários calibres. Na gama dos agregados finos, foi utilizada uma areia fina de calibre 0/1 *mm*, com uma massa volúmica de  $2,63 \text{ kg/dm}^3$ . Ainda na gama dos agregados finos, utilizou-se uma areia média 0/4 *mm*, com uma massa volúmica de  $2,63 \text{ kg/dm}^3$ . Na Figura 4.9, apresentam-se os agregados finos.



a)

b)

Figura 4.9. Agregados leves: a) Areia fina 0/1 *mm*; b) Areia média 0/4 *mm*.

Relativamente à parte dos agregados grossos, foram usados dois tipos de calibres, entre os quais um areão granítico de dimensões 4/8 *mm* e uma brita do tipo 6/14 *mm*. Na Figura 4.10 apresentam-se imagens relativas aos agregados grossos.



a)

b)

Figura 4.10. Agregados grossos: a) Areão 4/8mm; b) Brita calcária 6/14mm.

(i) Varões de aço

Foram utilizados varões de aço frequentemente usados nas estruturas de betão armado, A500 NR SD. Utilizou-se o mesmo diâmetro de varão  $\phi 10$  em todos os provetes, para que posteriormente pudesse ser feita uma comparação direta na análise de resultados. Quanto aos varões de aço, apenas existiu a variação do tipo de varão, liso e nervurado (Figura 4.11).



a)

b)

Figura 4.11. Tipo de varões usados: a) Varão nervurado  $\phi 10$ ; b) Varão liso  $\phi 10$ .

Não foram efetuados quaisquer tipo de ensaios de caracterização do aço, mas de acordo com o que vem prescrito no Eurocódigo 2 (EC2), os valores considerados para cálculos são apresentados no Quadro 4.1:

Quadro 4.1. Valores característicos do aço A550, segundo o EC2.

	$f_{sy}$ (MPa)	$f_{su}$ (MPa)	$\epsilon_{sy}$ (%)	$\epsilon_{su}$ (%)	$E_s$ (GPa)
A500 NR SD	500	550	2,5	12	200

(i) Fibras metálicas

Introdução de fibras metálicas em betões que possuíam também nanopartículas, constituiu uma novidade neste estudo. Procurou-se estudar o efeito desta combinação no comportamento dos tirantes, aderência e padrão de fendilhação. As fibras escolhidas, foram do tipo **DRAMIX RL 45/30 BN** (classe 45), apresentando como características: comprimento de 30 mm, diâmetro de 0,62 mm e fator de forma ( $l/d$ ) de 48. Caracterizam-se com sendo do tipo 3D, ou seja, tem uma ancoragem com apenas um lança curvo, como mostra a Figura 4.12.

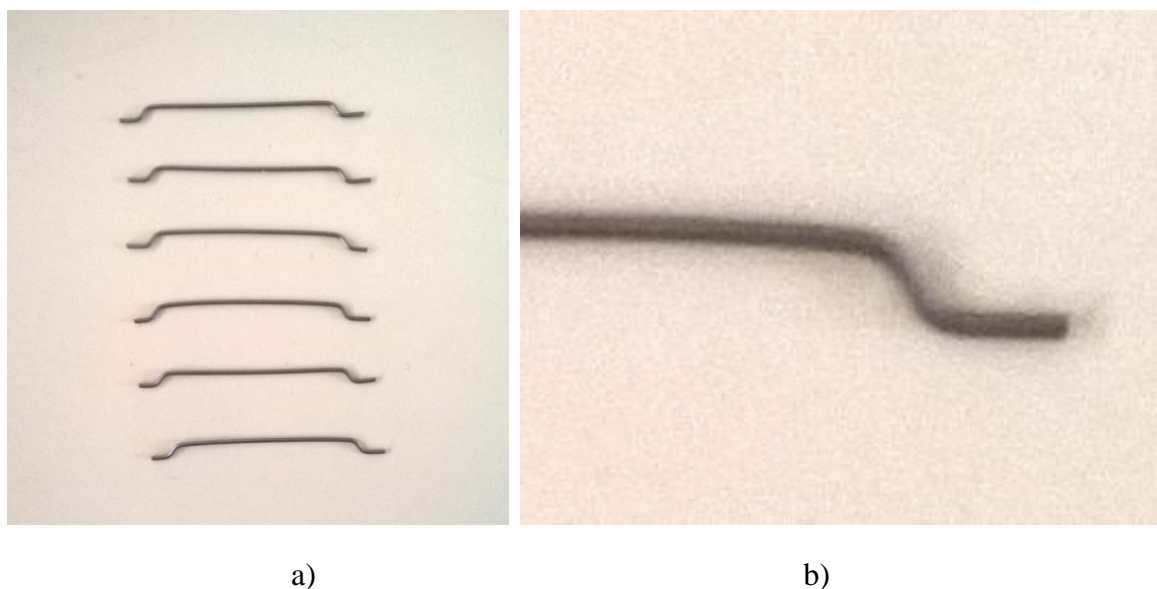


Figura 4.12. Fibras **DRAMIX RL 45/30 BN** : a) Fibras metálicas; b) Pormenor curvatura da ancoragem da fibra.

#### 4.6 Composição das misturas

Para produzir os provetes de ambos os ensaios (Pull Out e tirantes), procedeu-se à execução das oito misturas de betão. As quantidades dos seus constituintes, para cada uma das misturas, foram obtidas de acordo com uma metodologia proposta inicialmente por Lourenço et al. (2004) e, posteriormente desenvolvida por Costa (2007). Esta metodologia permite estimar, com fiabilidade, não só a densidade do betão, mas também a sua resistência à compressão, com base nas características da matriz ligante e nas propriedades intrínsecas dos agregados.

Como já referido, foram produzidas duas classes de misturas relativamente à dosagem de cimento, designadas por CA350 e CA550. Cada uma destas classes foi posteriormente dividida em várias misturas, desde logo uma mistura de referência (sem qualquer tipo de adição do tipo nanopartículas ou fibras) e as restantes onde se variou a introdução de nanopartículas, de fibras ou fibras e nanopartículas (em conjunto).

O uso de fibras apenas foi realizado nos betões CA550, devido aos resultados do estudo de aderência provenientes do trabalho de investigação (Lourenço *et al*, 2015).

A percentagem de nanopartículas escolhida para introduzir em ambas as misturas foi de 2%, relativamente à massa de cimento, sendo este valor resultado, mais uma vez, dos dados obtidos no trabalho de investigação desenvolvido anteriormente (Soldado *et al*, 2015), (Lourenço *et al*, 2015). A percentagem de utilização de fibras foi 0,5% por volume de mistura, embora também tenham sido realizados testes com 1% mas o uso desta percentagem demonstrou perdas significativas na trabalhabilidade do betão.

Nos quadros seguintes apresentam-se as composições das várias misturas:

Quadro 4.2. Misturas para a classe CA350.

Constituintes	CA350		CA350_Si2%		CA350_Al2%	
	Massa (kg)	Volume (L)	Massa (kg)	Volume (L)	Massa (kg)	Volume (L)
CEM I 52,5 R	230	74	223	71	223	71
Filer Calcário	120	44	120	44	120	44
Adjuvante	0,9	0,9	0,9	0,8	0,9	0,8
Água	161	161	156	156	156	156
Ar	----	20	----	20	----	20
Areia fina 0/1	227	86	228	87	229	87
Areia fina 0/4	681	259	684	260	688	261
Areão 4/8	187	71	188	71	188	71
Brita 6/14	755	284	760	286	759	285
Nanopartícula Si2%	----	----	7	3	----	----
Nanopartícula Al2%	----	----	----	----	7	2

Quadro 4.3. Misturas para a classe CA550.

	CA550		CA550_Si2%		CA550_Al2%		CA550_F0,5		CA550_F0,5_Al2%	
Constituintes	Massa (kg)	Volume (L)	Massa (kg)	Volume (L)	Massa (kg)	Volume (L)	Massa (kg)	Volume (L)	Massa (kg)	Volume (L)
CEM I 52,5 R	350	112	343	110	343	110	350	112	343	110
Adjuvante	2,1	2,0	2,7	2,6	2,4	2,3	2,1	2,0	2,1	1,9
Água	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140
Ar	----	20	----	20	----	20	----	20	----	20
Areia fina 0/1	239	91	238	91	240	91	238	91	238	90
Areia fina 0/4	718	273	715	272	719	273	713	271	714	271
Areão 4/8	190	72	190	72	190	72	189	72	189	72
Brita 6/14	770	289	769	289	770	289	764	287	764	287
Nanopartícula Si2%	----	----	7	3	----	----	----	----	----	----
Nanopartícula Al2%	----	----	----	----	7	2	----	----	7	1,8
Fibras 0,5	----	----	----	----	----	----	39	----	39	----

#### 4.7 Betonagem

A betonagem dos vários provetes ocorreu em dias diferentes. Foram feitas duas amassaduras por betonagem necessária ao enchimento dos moldes para os ensaios *Pull Out* e tirantes.

A Figura 4.13 mostra todo o processo de betonagem desde a pesagem dos materiais até ao processo de amassadura e enchimento de moldes.



a)



b)





c)

d)

Figura 4.13. Sequência de momentos da betonagem: a) Pesagem dos materiais; b) Misturadora em funcionamento; c) Enchimento provetes *Pull Out*; d) Enchimento provetes tirantes.

Foram também enchidos 4 provetes cúbicos com  $150\text{mm}$  de aresta para controlo da qualidade do betão produzido e, para as misturas com fibras, foi ainda produzido um provete prismático de  $100 \times 100 \times 500\text{mm}^3$ .

Foi usada uma misturadora de eixo vertical com capacidade total de  $90\text{ L}$ , bem como outros instrumentos como vibrador de agulha.

## 4.8 Caracterização do betão endurecido

Com o objetivo de caracterizar o betão no estado endurecido, realizaram-se ensaios para determinar: i) resistência à tração, ii) resistência à compressão, iii) módulo de elasticidade, iv) tensão de flexão residual para as misturas com fibras metálicas. Todos estes ensaios serão de seguida descritos.

### 4.8.1 Resistência à compressão e à tração

O ensaio de tração por compressão diametral (Figura 4.14) foi efetuado numa prensa universal de  $200\text{kN}$ , com uma velocidade de aplicação de carga igual a  $800\text{ N/s}$  até se atingir a rotura e utilizou-se um dispositivo específico para aplicação da carga de faca no provete. A cura dos provetes foi efetuada através de imersão em água, à temperatura de  $20^\circ\text{C}$ , até ao dia anterior à data de ensaio.

Os resultados da resistência à flexão,  $f_t$ , foram obtidos através da média de quatro provetes prismáticos ( $100 \times 100 \times 200\text{ mm}^3$ ) ensaiados aos 28 dias de idade, conforme especificação técnica NP EN 12390 (2003).



a)

b)

Figura 4.14. Ensaio de compressão diametral: a) Pormenor provete durante o ensaio; b) Provete após o ensaio.

A resistência à compressão,  $f_c$ , foi determinada pelo quociente entre a força de rotura e a área comprimida do provete, utilizaram-se três provetes cúbicos de  $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$  (Figura 4.15) para cada idade de ensaio (7, 28 e 56 dias) e três provetes cúbicos de  $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}^3$ , para confirmar valores aos 28 dias (Figura 4.15). Posteriormente, aquando da betonagem dos tirantes e dos *Pull Out* foram betonados mais dois provetes de  $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}^3$  para as idades de 7 e 28 dias. A cura destes provetes também foi efetuada através de imersão em água, à temperatura de  $20^\circ\text{C}$ , até ao dia anterior à data de ensaio.

O ensaio de compressão realizou-se numa prensa hidráulica de  $3000 \text{ kN}$ , com uma velocidade de aplicação de carga constante e igual a  $6 \text{ kN/s}$  para cubos de  $100 \text{ mm}$  de aresta e  $13,5 \text{ kN/s}$  para os de  $150 \text{ mm}$  de aresta, até à rotura, conforme a norma NP EN 12390 (2003).

A partir da média da força de rotura dos 3 provetes, calculou-se a correspondente resistência à compressão,  $f_c$ .

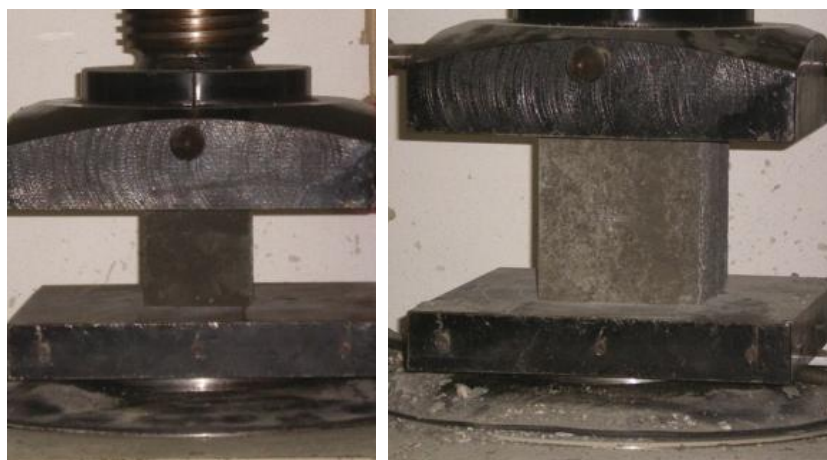


Figura 4.15. Ensaio de compressão em cubos de betão.

### 4.8.2 Módulo de elasticidade

Os ensaios realizaram-se na prensa vertical, aplicando ciclos de carga e descarga entre dois valores máximo (190 kN) e mínimo (10 kN) de força, em provetes prismáticos de  $100 \times 100 \times 400 \text{ mm}^3$  (Figura 4.16), de acordo com o procedimento descrito na especificação do LNEC E 397. Para a medição das deformações foram colados demecs (discos metálicos com 5mm de diâmetro) na superfície do betão (espaçados de 200mm) e utilizou-se um alongâmetro para efetuar as leituras.

Também estes provetes foram curados em água, à temperatura de 20°C e ensaiados após terem 28 dias de idade.

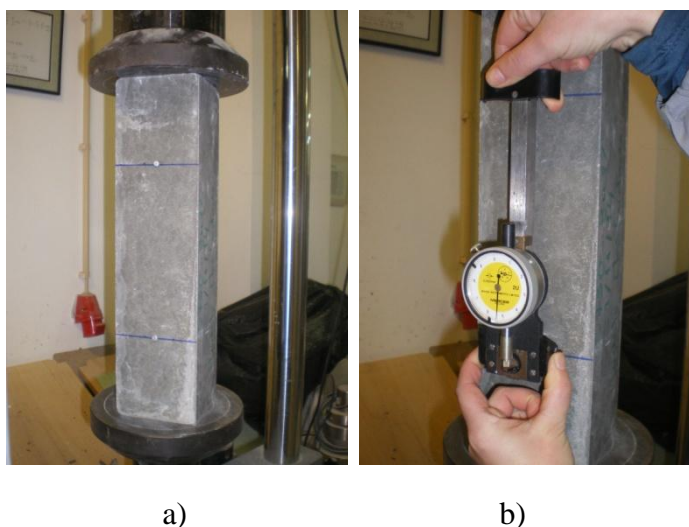


Figura 4.16. Ensaio de determinação do módulo de elasticidade: a) Provete na prensa; b) Medição da extensão com o alongâmetro.

No Quadro 4.4, apresentam-se todos os valores obtidos dos ensaios de caracterização do betão de compressão, tração e módulo de elasticidade para todas as misturas

Quadro 4.4. Valores caracterizadores do betão endurecido (compressão, tração e módulo de elasticidade).

Misturas	$f_{cm,cubo} (MPa)$		$f_{ctm} (MPa)$	Módulo Elasticidade (GPa)
	28 dias	Dia do Ensaio	28 dias	>28 dias
550	74,2	81,2	5,7	51,4
550Al2%	72,7	80,1	6,9	52,6
550Si2%	74,1	76,1	7,2	52,6
550F0,5	79,1	82,4	5,3	53,8
550F0,5Al2%	78,5	81,6	5,4	49,2
350	40,1	39,6	4,8	38,7



350Al2%	40,1	39,3	4,5	49,2
350Si2%	43,3	42,4	4,1	41,9

#### 4.8.3 Tensão de flexão residual

Os ensaios de tensão de flexão residual (Figura 4.17), caracterizadores de betões que contêm fibras metálicas no seu interior, foram realizados no atuador de carga com uma capacidade de 300 kN, a uma velocidade constante de 0,02 mm/s. Usaram-se provetes prismáticos de 100x100x500 mm<sup>3</sup>. Com estas dimensões foi possível ensaiar cada provete duas vezes, permitindo assim obter um número superior de valores para posterior cálculo da média aritmética.

O ensaio decorreu através de flexão em 3 pontos. Para medição das deformações do provete foram colocados dois LVDT's (com 50 mm de percurso) junto ao ponto de aplicação de carga. O ensaio decorreu de acordo com o procedimento descrito nas especificações RILEM TC 162-TDF e NP EN12390-5.

Tal como aconteceu com os ensaios anteriormente descritos os provetes foram curados em água, à temperatura de 20°C e ensaiados após terem 28 dias de idade. O Quadro 4.5 apresenta os resultados finais caracterizadores deste ensaio.

Quadro 4.5. Valores obtidos no ensaio de tensão de flexão residual

Misturas	$f_c$ (MPa)	$f_{Rm,1}$ (MPa)	$f_{Rm,2}$ (MPa)	$f_{Rm,3}$ (MPa)	$f_{Rm,4}$ (MPa)
550F0,5	5,96	4,43	2,69	1,72	1,25
550F0,5Al2%	6,61	4,89	2,94	1,39	0,89

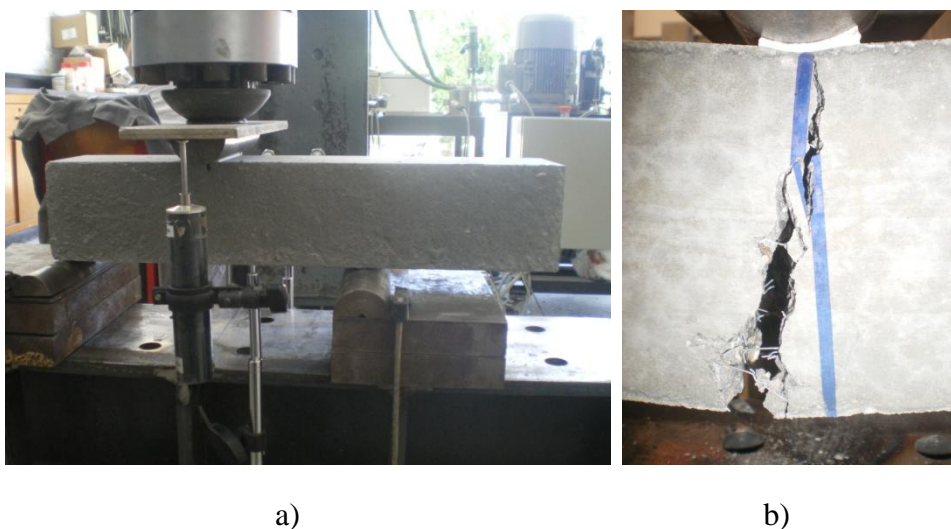


Figura 4.17. Ensaio de tensão de flexão residual. a) Carregamento do provete; b) Pormenor da rotura do provete.

## 4.9 Configuração geral dos ensaios experimentais

Com o objetivo de proporcionar um ensaio bem definido e com isso realizar as medições necessárias para o estudo da aderência, foi necessário preparar devidamente o esquema de ensaio. Este, era constituído por um atuador a funcionar à tração, com uma capacidade de carga de 180 kN, fixo a um pórtico metálico que funcionou como estrutura de reação.

A Figura 4.18 mostra o “*Setup*” utilizado nos dois ensaios.

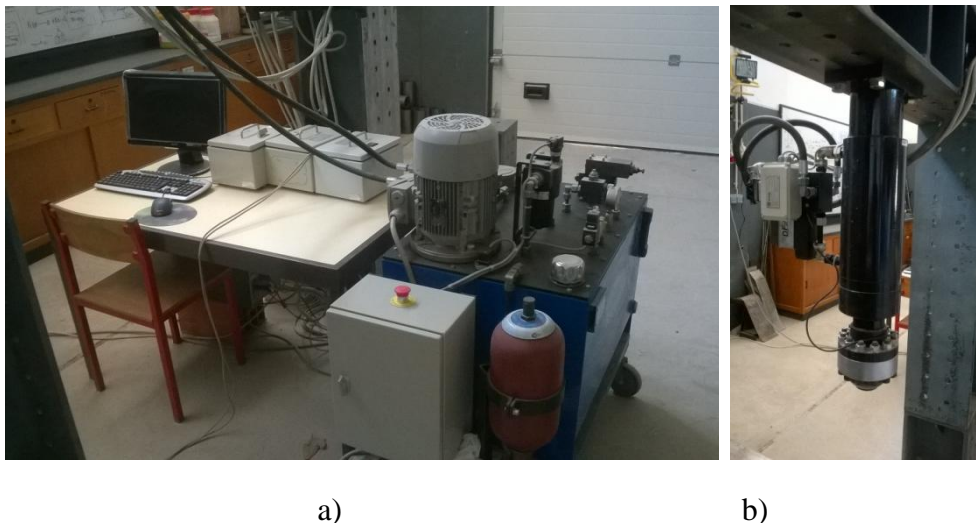


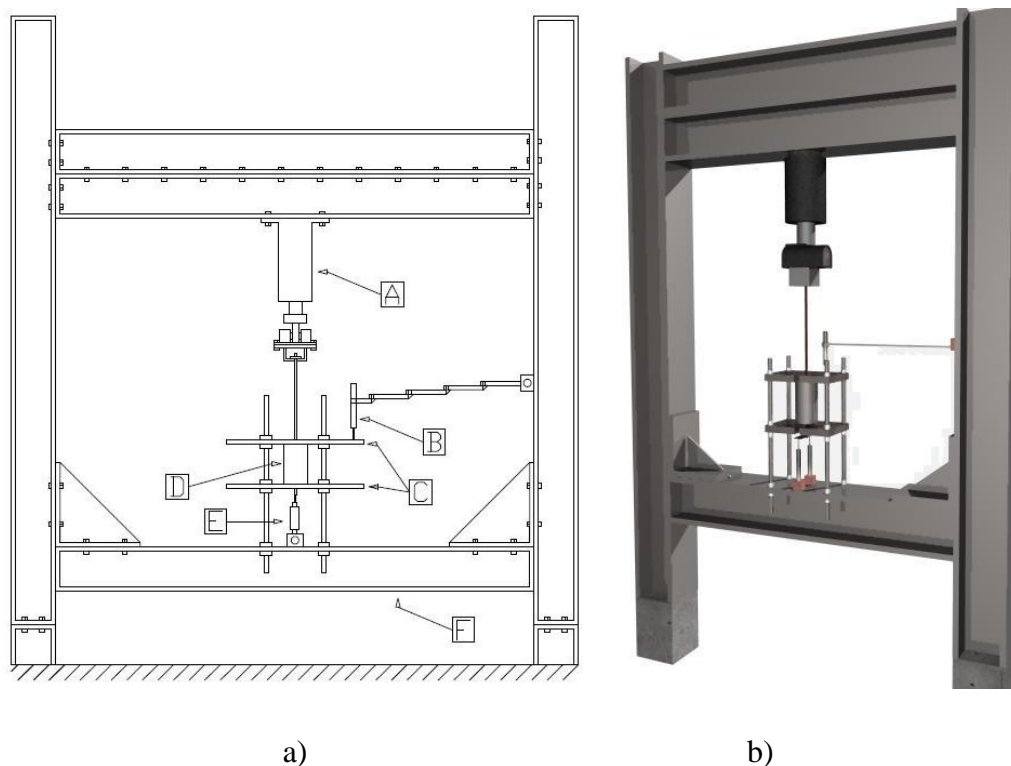
Figura 4.18. “*Setup*” de ensaio experimental: a) Central hidráulica e computação para o registo de dados; b) Pormenor do atuador de carga.

O próprio atuador fez medições tanto da força aplicada como do deslocamento. Ambos os ensaios decorreram por controlo de deslocamento, para que não existisse uma quebra abrupta da capacidade de carga assim que se atingisse o ponto máximo da força.

## 4.10 Ensaio Pull Out

Neste tipo de ensaios o provete foi colocado entre duas chapas metálicas, na parte superior e inferior, que por sua vez estavam fixas ao pórtico por 4 varões roscados, bem apertados para não existir qualquer movimento do betão.

O sistema do atuador fez medições tanto da força aplicada como do deslocamento, contudo para obter valores do deslocamento mais fidedignos e pormenorizados, foram colocados mais 3 LVDT's junto do provete (fixados exteriormente no pórtico, para monitorizar a existência de qualquer movimento indesejado). Na Figura 4.19 apresenta-se o esquema de montagem de todo o ensaio.



**A - Atuador; B - LVDT superior; C – Estrutura de suporte e reação; D – Provete; E – LVDT inferior; F – Pórtico metálico de reação.**

Figura 4.19. Esquema do ensaio *Pull Out*. a) Corte do pórtico do ensaio *Pull Out*; b) Representação 3D do pórtico do ensaio.

Na parte inferior do provete, colocaram-se 2 dos LVDT's, um em contato com o varão (através da fixação de uma pequena chapa metálica ao varão) medindo o deslocamento do próprio varão. O outro LVDT ficou em contato com o betão para medir os movimentos que o betão poderia apresentar, devido a deformações da estrutura de suporte do provete.

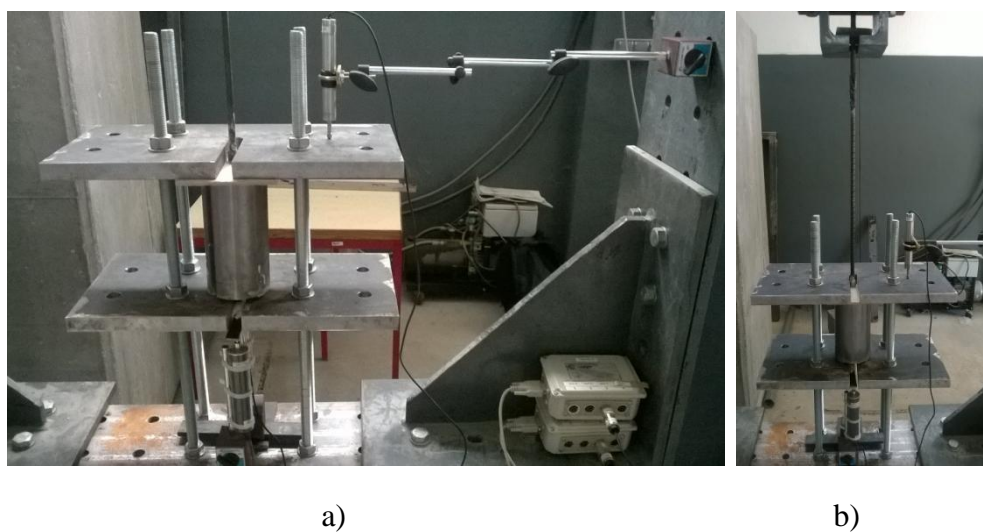


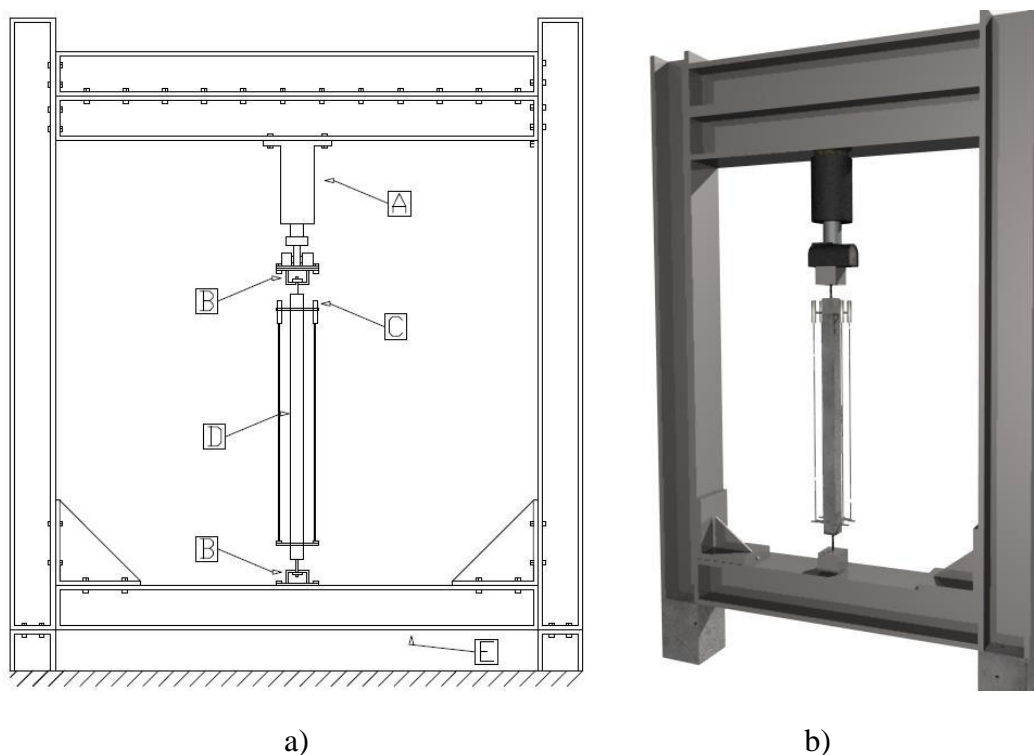
Figura 4.20. Ensaio *Pull Out* em execução.

O último LVDT foi colocado na parte superior do provete, para medir o deslocamento que a chapa de reação poderia ter, devido não só à sua deformação mas também devido ao ajustamento das próprias porcas de fixação e deformações no varão roscado. Procurou-se eliminar todos os deslocamentos e deformações da estrutura envolvente ao provete e que em nada contribui para a obtenção dos resultados verdadeiros. A Figura 4.20 mostra o ensaio a decorrer e toda a sua instrumentação.

#### 4.11 Ensaio Tirantes

Para a preparação deste ensaio foi necessário alterar o pórtico que estava preparado para os ensaios *Pull Out*, houve a necessidade de aumentar a distância entre as vigas de reação do pórtico para assim acomodar os tirantes. Por motivos semelhantes do ensaio *Pull Out*, optou-se por colocar 4 LVDT's exteriores, cada um posicionado junto às 4 arestas do provete (Figura 4.22, b)). Colocaram-se vários LVDT's, porque sabia-se que o tirante não teria uma deformação linear. Apesar de ser um ensaio em tração pura, era de prever, com base em ensaios anteriores, que cada uma das faces tivesse deformações ligeiramente diferentes. A deformação axial do tirante foi determinada usando a média das leituras dos 4 LVDT's.

A Figura 4.21 apresenta o esquema de montagem do ensaio de tirante.



**A - Atuador; B – Chapa de encaixe ancoragem; C – LVDT's; D – Tirante; E – Pórtico metálico de reação.**

Figura 4.21. Esquema do ensaio tirante: a) Corte do pórtico do ensaio tirante; b) Representação 3D do pórtico de ensaio.

Procedeu-se também à medição da largura de fendas (Figura 4.22, c) utilizando para tal uma régua graduada. Cada medição foi realizada no momento de abertura de novas fendas e mais duas medições depois do varão entrar em cedência. Para medir a largura das fendas foi preciso parar o ensaio, efetuando-se medições em todas as fendas já existentes nas 4 faces do tirante. A Figura 4.22 mostra os vários momentos dos ensaios, bem como a instrumentação utilizada.

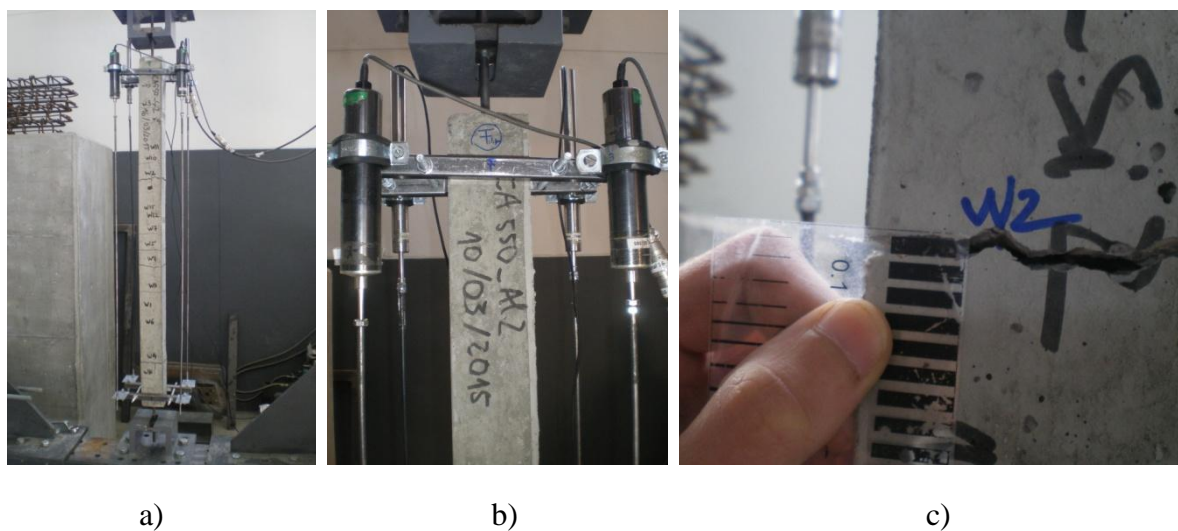


Figura 4.22. Ensaio tirante em execução: a) Perspetiva geral do ensaio; b) Pormenor LVDT's; c) Leitura da largura de fendas.



## 5. ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados todos resultados obtidos e tratados, bem como várias relações possíveis entre vários parâmetros. Na discussão de resultados efetua-se uma análise crítica dos valores obtidos experimentalmente tendo também em conta os resultados teóricos calculados.

A designação dada para os provetes estudados está definida na Figura 5.1.

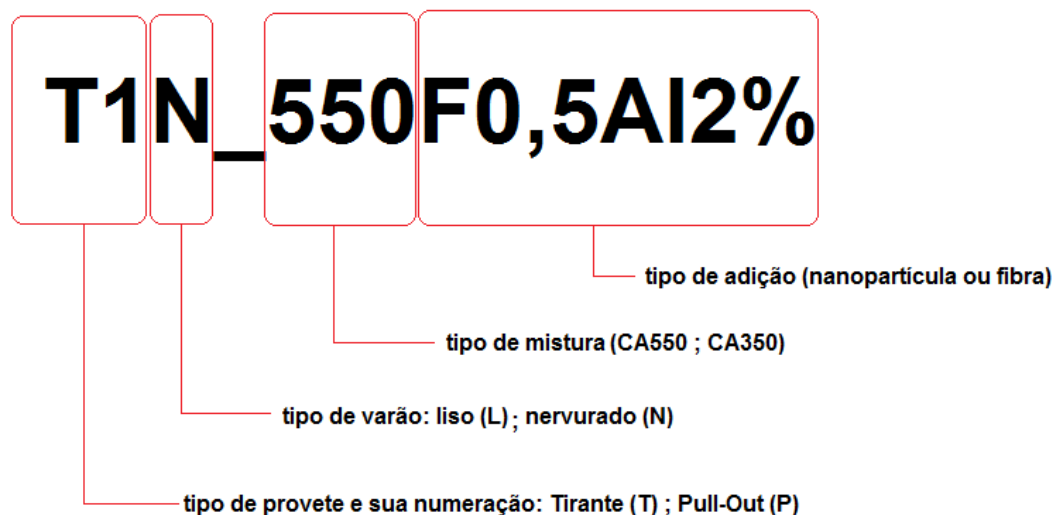


Figura 5.1. Designação para os provetes estudados.

### 5.1 Resultados dos ensaios *Pull Out*

A rotura da aderência ocorreu como previsto, conseguindo-se atingir o valor máximo de tensão sem que antes houvesse rotura do betão, isto conseguido devido ao confinamento imposto. Contudo, num dos provetes (P3N\_550Si2%) não se conseguiu obter o resultado esperado, porque houve uma rotura inesperada na soldadura da chapa ao varão (não se conseguiu fazer a média, utilizou-se como valor final, nesta série, os resultados de apenas um provete).

#### 5.1.1 Análise força-deslocamento

Os primeiros resultados determinados foram a relação Força-Deslocamento. O deslocamento medido foi obtido, como descrito anteriormente, através da relação dos vários LVDT's fixos em cada tirante. Contudo, na fase de análise de resultados, percebeu-se que um dos LVDT's, teve em alguns ensaios registos algo anómalos. Concluiu-se que poderia existir algum problema quanto ao seu bom funcionamento eletrónico. Houve um segundo LVDT, posicionado na parte superior, que também apresentou problemas nas leituras dos deslocamentos, possivelmente devido à deformação de umas das chapas usadas no sistema de medição. Por estes motivos, foram eliminados os resultados destes dois LVDT's da análise. O



deslocamento ficou assim atribuído unicamente ao LVDT colocado no varão, e admitiu-se que a estrutura de reação era suficientemente rígida e que a sua deformação era desprezável.

Os resultados da relação força-deslocamento de cada mistura, foram determinados através do cálculo da média aritmética entre os resultados das duas amostras que compunham cada série.

Apresentam-se, nas Figuras 5.2 e 5.3 as curvas resultantes (força-deslocamento), nas várias séries, estando separado os varões lisos dos varões nervurados:

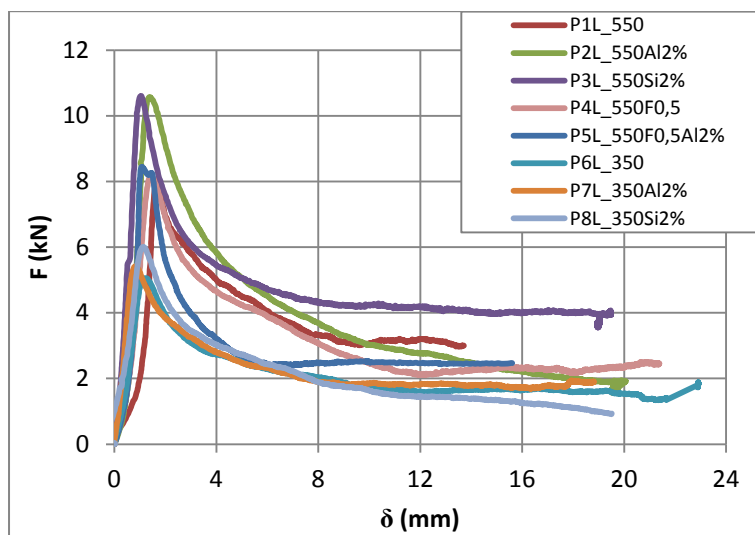


Figura 5.2. Relação força-deslocamento para varões lisos.

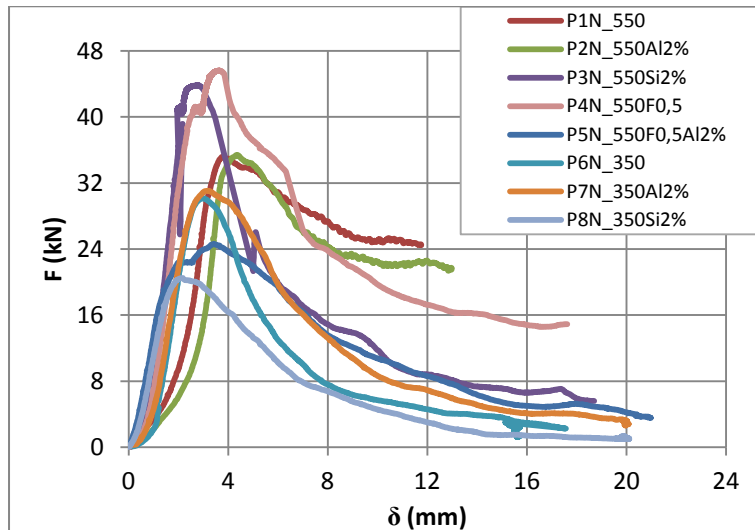


Figura 5.3. Relação força-deslocamento para varões nervurados.

É possível observar que, para os varões lisos, a incorporação de nanopartículas obteve resultados positivos, pelo aumento da força máxima de aderência. Na classe CA550 o uso de nanos do tipo sílica e alumínio de forma individual tiveram os melhores resultados,  $F=10,6 \text{ kN}$  e  $F=10,5 \text{ kN}$  respetivamente, superando mesmo, de forma inesperada, os provetes que continham fibras metálicas, que teoricamente poderiam apresentar uma força de arrancamento



superior devido às características de rigidez e ductilidade que as fibras dão ao betão como já comprovado cientificamente. Observando a classe CA350, ainda nos varões lisos, os resultados obtidos seguem a mesma linha de resultados, com os provetes com nanopartículas (para sílica  $F=6\text{ kN}$  e alumínio  $F=5,4\text{ kN}$ ) a obterem melhores resultados que o provete de referência ( $F=5\text{ kN}$ ). É de salientar ainda que a nanopartícula de sílica mostra em ambas as classes o melhor resultado.

Analisando os resultados obtidos para os varões nervurados, é de notar o melhor resultado para o provete com fibras metálicas (P4N\_550F0,5) com  $F=45,6\text{ kN}$ . Contudo, mais uma vez a nanopartícula de sílica apresenta bons resultados ( $F=43,8\text{ kN}$ ), destacando-se mesmo como o segundo melhor provete da classe CA550, com resultados significativos relativamente ao provete de referência desta classe. A nanopartícula de alumínio, nos varões nervurados, ficou um pouco abaixo do esperado ( $F=35,4\text{ kN}$ ), apresentando valores próximos da referência ( $F=35,4\text{ kN}$ ), deixando concluir que o seu uso em nada contribuiu positivamente para a força de aderência.

Os deslocamentos obtidos nas várias curvas, demonstram que nos varões nervurados existe um maior deslocamento do varão antes de atingir o pico de aderência. Este fenómeno é explicado pela existência das componentes de aderência que nos varões nervurados são ativadas como o atrito e a aderência mecânica. A falta destas componentes nos varões lisos levam, como esperado, a que as forças de aderência sejam bastante reduzidas e à existência de reduzidos deslocamentos até ao ponto de rotura. Isto é, a rotura da força de aderência nestes varões é atingida muito rapidamente, sem que para isso se inicie um deslocamento que é resultado da “ajuda” que as componentes atrito e aderência mecânica dão na resistência.

### 5.1.2 Análise tensão-deslocamento

Convertendo a força aplicada, para tensão tangencial, através da expressão:

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (5.1)$$

Onde:

$F$  - força aplicada;

$A$  - área da zona do varão em contato com o betão, ou seja o perímetro do varão multiplicado pela altura de varão aderente ao betão (neste caso  $50\text{ mm}$ ).

Obtêm-se assim a relação tensão-deslocamento, apresentado nas figuras 5.4 e 5.5.

Uma vez que os traçados destes gráficos (Figuras 5.4 e 5.5) são iguais ao traçado da relação Força-Deslocamento (apresentados anteriormente) o raciocínio de análise quanto aos ganhos do uso de nanopartículas é idêntico, o que não justifica estar a repetir essa informação, estando essa análise atrás descrita.

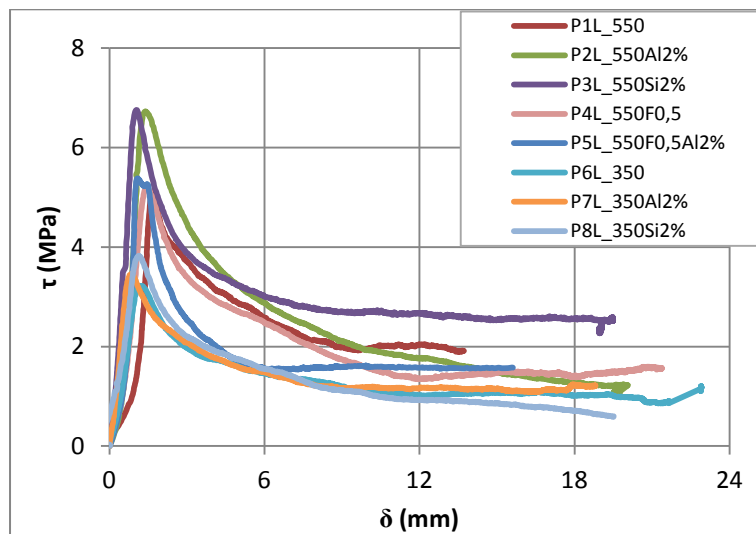


Figura 5.4. Relação tensão-deslocamento para varões lisos.

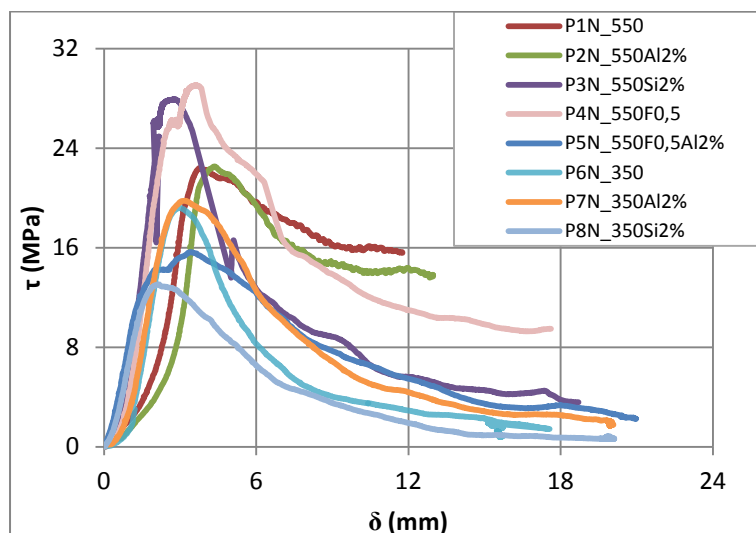


Figura 5.5. Relação tensão-deslocamento para varões nervurados.

Após a obtenção das várias curvas de tensão de aderência, para as várias misturas, foi possível determinar, para cada uma, os seguintes parâmetros: i)  $\tau$  máxima, ii)  $\tau$  para 80% depois do pico de tensão, iii)  $\tau$  para 50% e iv)  $\tau$  residual. O objetivo é caracterizar o melhor possível a curva tensão de aderência - deslocamento, para assim identificar melhor as diferenças entre as várias séries.

Os valores dos referidos parâmetros estão apresentados no Quadro 5.1. A falta de certos valores na tabela prende-se com a não existência de valores na zona pretendida.

Quadro 5.1. Níveis de tensão recolhidos para as várias misturas e tipos de varão.

Misturas	$\tau_{\text{máx}}$ (MPa)		$\tau_{80\%}$ (MPa)		$\tau_{50\%}$ (MPa)		$\tau_{\text{residual}}$ (MPa)	
	Nervurado	Liso	Nervurado	Liso	Nervurado	Liso	Nervurado	Liso
550	22,4	5,1	17,9	4,2	----	2,7	15,9	1,9
550Al2%	22,5	6,7	18,0	5,4	----	3,4	14,1	1,8
550Si2%	27,9	6,8	----	5,4	14,0	3,4	5,3	2,7
550F0,5	29,1	5,2	23,3	4,2	14,5	2,6	10,4	1,4
550F0,5Al2%	15,7	5,4	12,5	4,3	7,8	2,7	3,1	1,6
350	19,2	3,2	15,4	2,6	9,6	1,6	2,6	1,1
350Al2%	19,8	3,5	15,8	2,8	9,9	1,7	2,6	1,2
350Si2%	13,1	3,8	10,5	3,0	6,5	1,9	0,9	1,0

É de notar que a  $\tau_{\text{residual}}$  da mistura CA550 nervurado, é a que apresenta um valor mais elevado apesar de não ser aquela que apresentou uma  $\tau_{\text{máx}}$  maior. Este dado pode ser justificado, em termos científicos, pela existência de boa resistência nas componentes de atrito e aderência mecânica. Analisando a mistura 550Si2% notou-se que apresenta uma  $\tau_{\text{residual}}$  bastante baixa tendo em conta a sua  $\tau_{\text{máx}}$ , concluindo-se que após a rotura mecânica o atrito entre o betão e o aço foi reduzido.

Pela observação dos valores do Quadro 5.1, pode-se verificar que a introdução de nanopartículas não apresenta grande influência após o pico de aderência. A acentuação na quebra dos valores de aderência após o pico de tensão foram sempre maiores nos provetes com nanopartículas. As tensões residuais nos provetes com nanopartículas foram sempre menores que os provetes de referência. Deixando como única observação, que o uso de nanopartículas apenas teve influência na obtenção da  $\tau_{\text{máx}}$ , deixando a partir desse ponto de a sua incorporação ser benéfica.

Uma vez obtidos os valores de  $\tau_{\text{máx}}$  em todos os provetes ensaiados, a comparação entre eles como forma de primeira conclusão é essencial.

A Figura 5.6 apresenta de forma resumida, a comparação entre os valores de tensão máxima de aderência para todas as misturas e variáveis.

Desta análise pode observar-se que, no caso dos varões lisos, o destaque, quanto à maior tensão de aderência, vai para as misturas CA550, incorporando nanopartículas (Si2% e Al2%) apresentando melhorias de 33,3% e 31,4%, respetivamente. A introdução de fibras metálicas neste tipo de mistura obteve melhorias fracas relativamente à referência, podendo-se considerar, uma vez que o número de amostras é baixo, que o comportamento das fibras não alterou significativamente o comportamento geral.

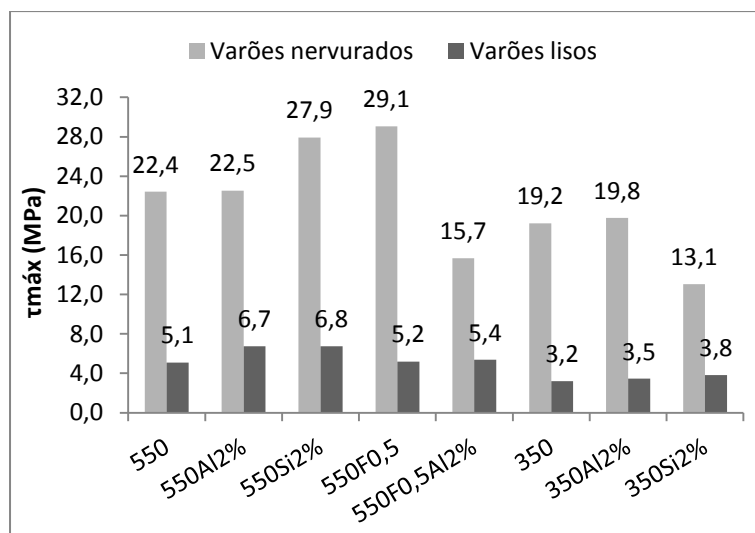


Figura 5.6. Valores da tensão máxima de aderência em todos os provetes.

Na classe CA350, ainda nos varões lisos, a introdução de nanopartículas também apresentou melhorias (embora pouco consideráveis) em relação à mistura de referência.

Nos varões nervurados parece haver algumas diferenças com a utilização das diferentes misturas. Na classe CA550, a introdução de Si2% continua trazer benefícios, há um aumento de 24,6% na tensão máxima de aderência, semelhante ao verificado nos varões lisos. Além disso, neste tipo de varões, a introdução de fibras mostrou ser a mais vantajosa, apresentando uma melhoria relativamente à referência muito boa, de aproximadamente 30%. Este comportamento dos provetes com fibras pode ser explicado (como desenvolvido no Capítulo 2) pela capacidade que as fibras têm para dar continuidade à transmissão das tensões de tração depois de surgir a microfendilhação.

### 5.1.3 Análise tensão máxima-resistência do betão ( $f_{cm,cil}$ )

Da caracterização do betão no estado endurecido (subcapítulo 4.8), obteve-se a resistência à compressão em cubos,  $f_{cm,cubo}$ . Contudo, pretendendo-se estabelecer a relação entre a capacidade resistente do betão e as tensões de aderência, foi necessário converter os valores obtidos ( $f_{cm,cubo}$ ) para valores de resistência em provetes cilíndricos ( $f_{cm,cil}$ ). Para isso, usou-se a seguinte expressão:

$$f_{cm,cil} = f_{cm,cubo} * 0,8 \quad (5.2)$$

No Quadro 5.2, apresenta-se a síntese dessa conversão.

Quadro 5.2. Valores convertidos de  $f_{cm,cil}$ .

Misturas	$f_{cm,cil}$ (MPa)
550	59,3
550Al2%	58,2

550Si2%	59,3
550F0,5	63,2
550F0,5Al2%	62,8
350	32,1
350Al2%	32,1
350Si2%	34,6

Com estes valores, foi possível relacionar o comportamento dos provetes em termos de tensão máxima de aderência, com a resistência do betão, como mostram as Figuras 5.7 e 5.8.

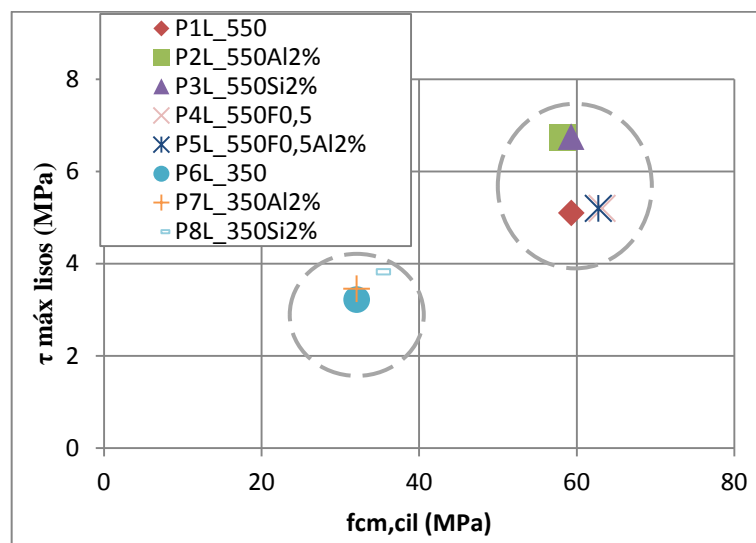


Figura 5.7. Gráfico relação  $\tau_{\text{máx}}$  e resistência betão para varões lisos.

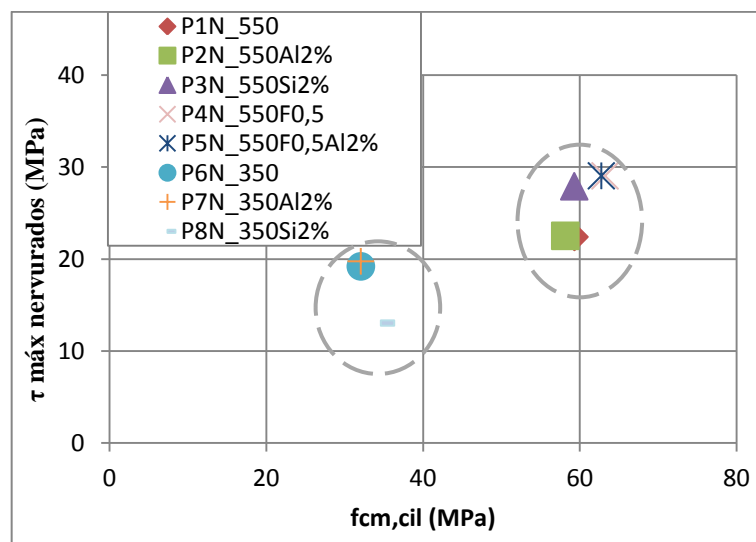


Figura 5.8. Gráfico relação  $\tau_{\text{máx}}$  e resistência betão para varões nervurados.

É possível distinguir em ambas as figuras (5.7 e 5.8) a formação, como esperado, de duas regiões onde os valores estão mais próximos. Estas regiões correspondem às duas variantes de

misturas (CA550 e CA350). Em ambos os tipos de varões, as misturas CA550 apresentaram valores mais elevados da tensão de aderência, como esperado e já verificado nos subcapítulos anteriores.

A análise relativa aos varões lisos, a relação  $\tau_{m\acute{a}x} - f_{cm,cil}$ , aponta os bons resultados das misturas que contêm nanopartículas, tanto nas misturas CA 350 como CA550, de nano sílica (Si2%) e de nano alumínio (Al2%), relativamente às misturas de referência. Com a falta de atrito que os varões lisos apresentam, verifica-se que o uso de fibras metálicas não resultou em ganhos significativos relativamente à mistura de referência.

No caso dos varões nervurados, para a classe CA550, o destaque vai para as misturas com fibras metálicas. A existência de nervuras permite tirar proveito da incorporação das fibras, ou seja, o aumento da capacidade resistente do betão à tração proporcionado pela introdução das fibras é relevante para o aumento das componentes de aderência por atrito e por resistência mecânica.

Nos varões lisos ocorreu um escorregamento mais rápido, sem haver as tensões transmitidas pelas fibras, provavelmente as fibras não chegaram a ser suficientemente solicitadas. Neste tipo de varões o uso de nanopartículas, na relação  $\tau_{m\acute{a}x} - f_{cm,cil}$ , não mostrou trazer benefícios, apresentando, no caso da mistura 350Si2% e 550Al2%, piores resultados relativamente às misturas de referência.

#### 5.1.4 Análise (tensão residual/tensão máxima) - resistência do betão ( $f_{cm,cil}$ )

Tendo como base novamente a resistência betão à compressão ( $f_{cm,cil}$ ), é possível fazer uma análise de comparação com a relação  $\tau_{res}/\tau_{m\acute{a}x}$ . Esta relação traduz ou representa de certa forma a componente do atrito relativamente à soma de todas as componentes de aderência.

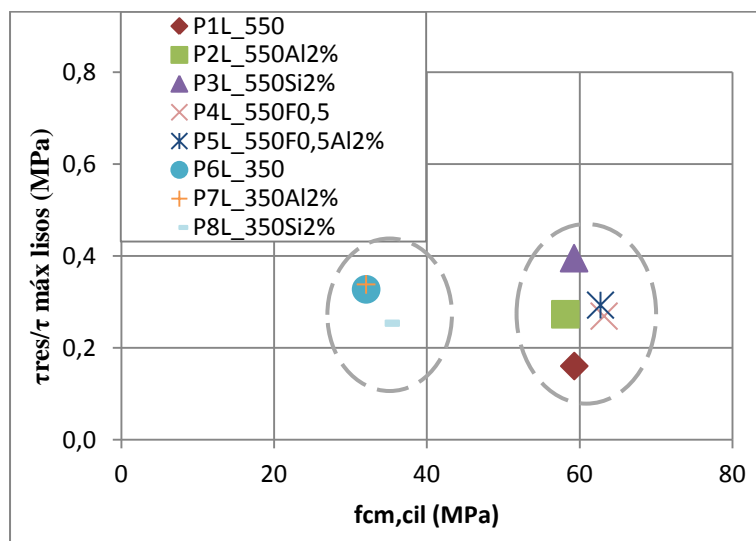


Figura 5.9. Gráfico relação ( $\tau_{res}/\tau_{m\acute{a}x}$ ) e resistência betão à compressão ( $f_{cm,cil}$ ), para varões lisos.

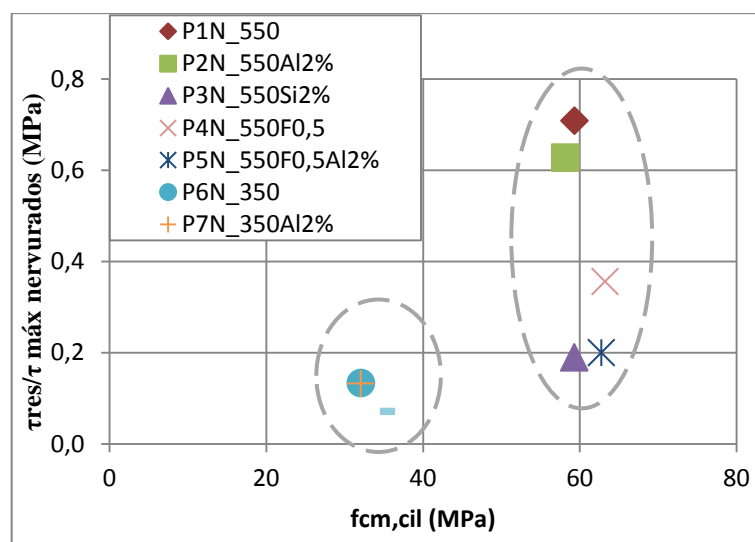


Figura 5.10. Gráfico relação ( $\tau_{res}/\tau_{máx}$ ) e resistência betão à compressão ( $f_{cm,cil}$ ), para varões nervurados.

Observando a Figura 5.9 é possível afirmar que, em termos relativos, o efeito do atrito nos provetes da classe CA550 é mais elevada para aqueles que têm nanopartículas incorporadas. De uma forma mais relevante destaca-se o provete com sílica, que mostra a maior diferença relativamente ao provete de referência. Os restantes provetes desta classe mostram também melhorias, relativamente à referência, apontando comportamentos semelhantes entre eles em termos de tensão residual. Na classe CA350, o provete de sílica apresenta um mau resultado, relativamente á referência, uma vez que apresenta uma resistência à compressão maior e uma tensão residual menor. Nesta mesma classe é possível afirmar que o efeito das nanopartículas em nada favoreceu os resultados.

A análise da Figura 5.10, que apresenta resultados para os varões nervurados, torna-se importante uma vez que a componente do atrito é mais significativa neste tipo de varões. De uma forma despretensiosa, os resultados da classe CA550, foram de certa forma contrários aos obtidos nos varões lisos para a mesma classe. Aqui, a componente de atrito não obteve resultados positivos quando o provete tinha incorporado nanopartículas. Destacando-se de forma muito negativa o provete com sílica e o de fibras+alumínio, com resultados, comparativos com o provete referencia, muito abaixo deste. De forma igual ao que aconteceu nos varões lisos, os provetes da classe CA350, demonstraram comportamentos semelhantes, com o provete de sílica a apresentar novamente um mau resultado em comparação com a referência.

Em carácter de conclusão estas figuras vêm confirmar aquilo já analisado no Quadro 5.1, que o uso de nanopartículas não apresentam grande influência na componente do atrito. Alguns dos resultados aqui obtidos, não deixam tirar outras conclusões uma vez que não se vem verificando uma linearidade quanto aos ganhos que as nanopartículas podem trazer quando incorporadas no betão.

## 5.2 Resultados dos ensaios de tração dos tirantes

A evolução da largura que uma determinada fenda toma ao longo do tempo numa peça de betão armado, influencia diretamente a sua durabilidade. São conhecidos os efeitos que uma abertura excessiva da fenda pode trazer quanto à deterioração das armaduras localizadas dentro do betão. Quanto maior a abertura, mais depressa a armadura pode desenvolver corrosão. Por isso, é preciso limitar a largura da fenda para atenuar este problema.

Com base nos resultados recolhidos durante os ensaios dos tirantes foi possível estabelecer uma relação, ao longo de todo o ensaio, entre a tensão aplicada no aço e a deformação do tirante (com base nos deslocamentos registados pelos LVDT's). Como já foi referido, o deslocamento baseia-se no cálculo da média das leituras dos 4 LVDT's. Em cada gráfico foi possível identificar os momentos da abertura de novas fendas. Foi possível também, através de outros dados recolhidos, como a largura de fendas, obter um registo completo de todas as variáveis envolvidas.

A leitura da largura das fendas que se apresentam nas figuras que se seguem, foram registadas para valores de tensão no aço próximos de 200 MPa, 300 MPa, 400 MPa e 500 MPa. Contudo, como o registo foi realizado cada vez que uma nova fenda aparecia, o atingir destes valores mostrou ser difícil de atingir com precisão. Foram usados os registos mais próximos daqueles patamares de tensão. Este registo pormenorizado da evolução da largura de fendas foi importante para analisar a influência da incorporação das nanopartículas no betão.

### 5.2.1 Análise da relação tensão no aço-deslocamento

#### Varões Lisos

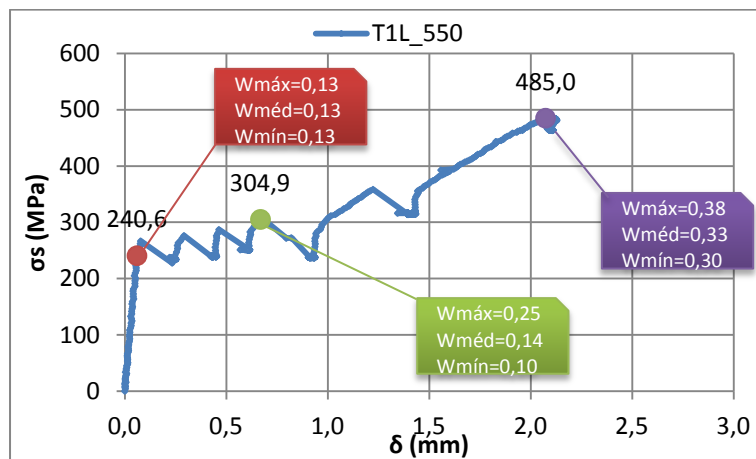


Figura 5.11. Relação tensão no aço – deslocamento do tirante T1L\_550 e registos da largura das fendas ( $w$  em mm) ao longo do ensaio.



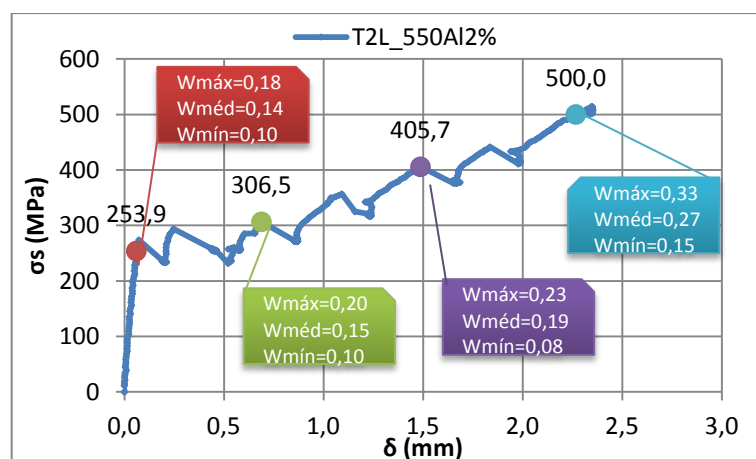


Figura 5.12. Relação tensão no aço – deslocamento do tirante T2L\_550Al2% e registos da largura das fendas ( $w$  em mm) ao longo do ensaio.

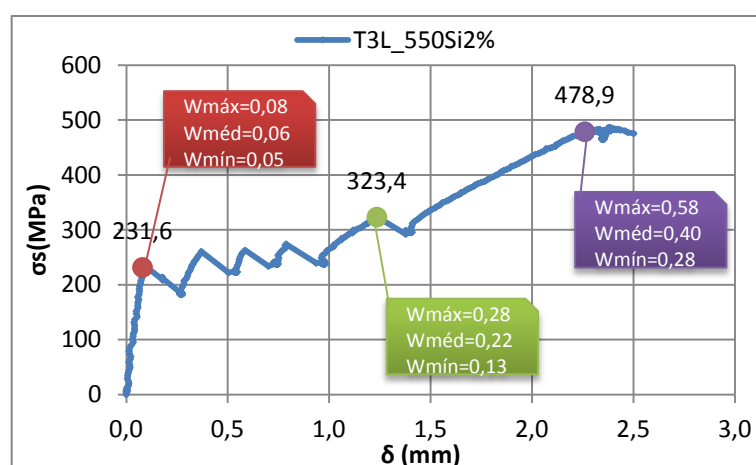


Figura 5.13. Relação tensão no aço – deslocamento do tirante T3L\_550Si2% e registos da largura das fendas ( $w$  em mm) ao longo do ensaio.

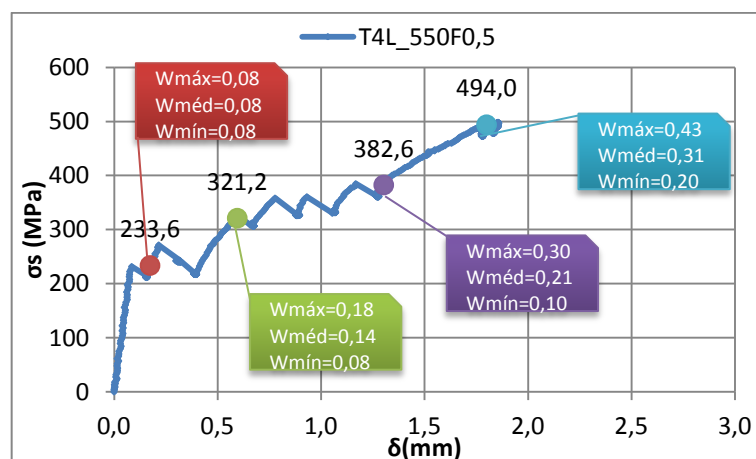


Figura 5.14. Relação tensão no aço – deslocamento do tirante T4L\_550F0,5 e registos da largura das fendas ( $w$  em mm) ao longo do ensaio.

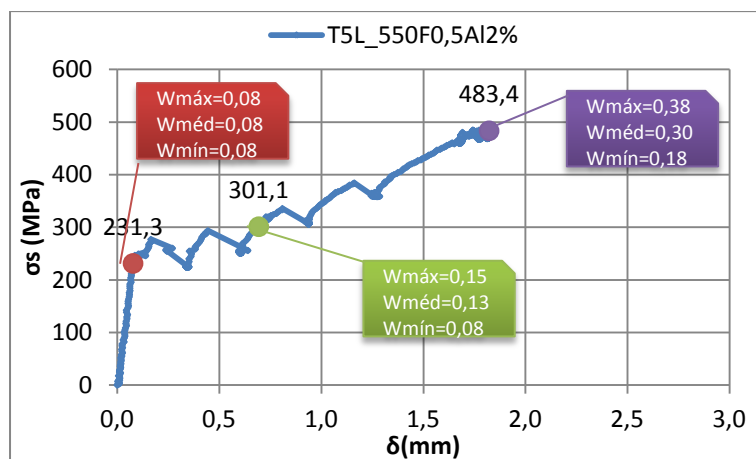


Figura 5.15. Relação tensão no aço – deslocamento do tirante T5L\_550F0,5Al2% e registos da largura das fendas ( $w$  em mm) ao longo do ensaio.

A comparação de resultados (largura de fendas entre os provetes) foi feita para tensões próximas, isto é, o registo da largura das fendas não se deu para níveis de tensões pré-definidos, como explicado no início deste subcapítulo, passando a única possibilidade para uma análise coerente para valores próximos, havendo apenas umas diferenças entre tensões para comparação contidas num intervalo de  $\pm 20 \text{ MPa}$ .

Para os tirantes da classe CA550, é possível verificar que a máxima largura das fendas registada,  $W_{máx}$ , aconteceu para o provete que continha nanopartículas de sílica, com um valor de  $0,58 \text{ mm}$ , e para valores de tensão próximos de  $479 \text{ MPa}$ . O melhor resultado deu-se no provete que continha nanopartícula de alumínio com um valor de  $W_{máx}=0,33 \text{ mm}$  para uma tensão de  $500 \text{ MPa}$ . O uso de fibras não influencia muito o valor da largura máxima das fendas. Na mistura de referência o valor observado foi de  $W_{máx}=0,38 \text{ mm}$ , e no caso da mistura contendo apenas fibras,  $W_{máx}=0,43 \text{ mm}$ .

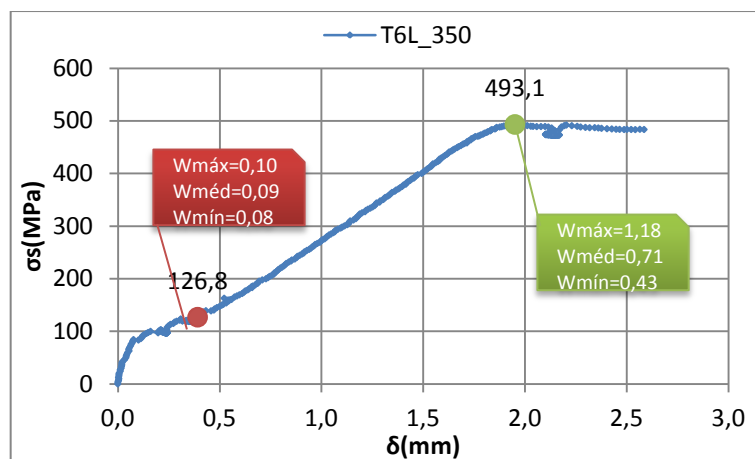
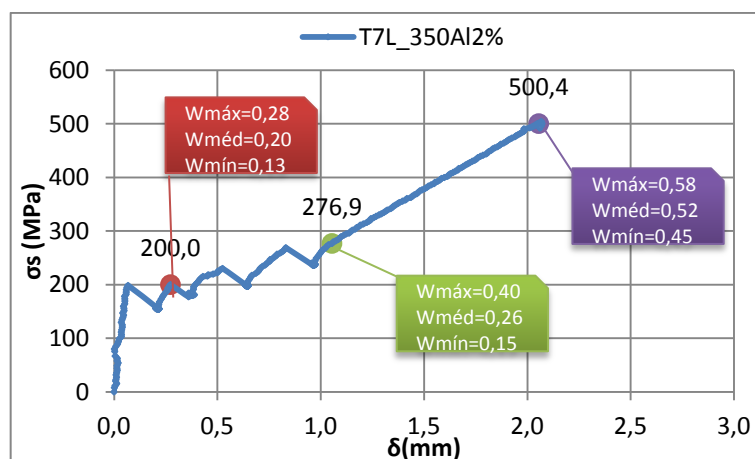
O uso de nanopartículas de alumínio apresentou uma melhoria na diminuição do valor médio da largura das fendas relativamente à mistura de referência de aproximadamente 13,2%. Por outro lado, o tirante com a incorporação de nanopartículas de sílica apresentou um resultado pior, cerca de 52,6%.

É de notar ainda, o registo das tensões para abertura de 1ª fenda, a tensão mais elevada foi registada na classe CA550, para a mistura contendo fibras metálicas e alumínio em conjunto (F0,5Al2%). Este resultado era de esperar, pois o aparecimento da 1ª fenda está diretamente relacionado com a resistência do betão à tração.

No Quadro 5.3 apresentam-se todos os valores registados de tensão no aço aquando da abertura na 1ª fenda:

Quadro 5.3. Tensão de abertura da 1ª fenda para classe CA550 de varões lisos.

Provetes	$\sigma_s$ (MPa)
T1L_550	267
T2L_550Al2%	273
T3L_550Si2%	237
T4L_550F0,5	231
T5L_550F0,5Al2%	276

Figura 5.16. Relação tensão no aço – deslocamento do tirante T6L\_350 e registos da largura das fendas ( $w$  em mm) ao longo do ensaio.Figura 5.17. Relação tensão no aço – deslocamento do tirante T7L\_350Al2% e registos da largura das fendas ( $w$  em mm) ao longo do ensaio.

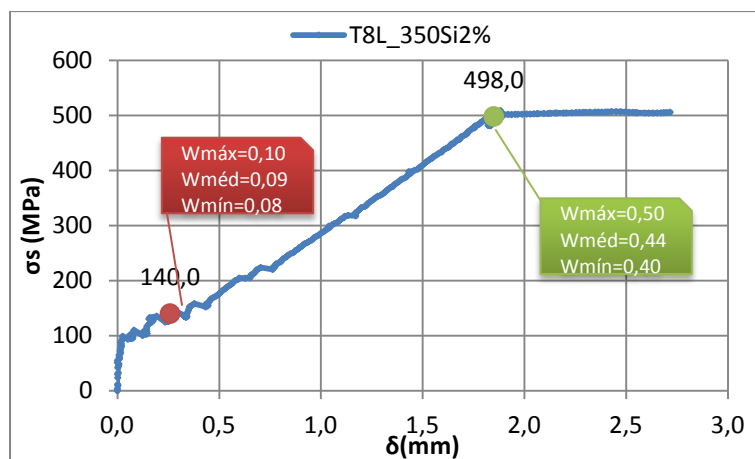


Figura 5.18. Relação tensão no aço – deslocamento do tirante T8L\_350Si2% e registros da largura das fendas ( $w$  em  $mm$ ) ao longo do ensaio.

A classe CA350, nos varões lisos, apresentou, como era esperado, valores da largura de fenda superiores à classe CA550, uma vez que o betão é teoricamente menos resistente. Então, a tensão de aderência é menor e isso implica uma maior distância entre fendas que, por sua vez, origina fendas com maiores larguras. O uso de nanopartículas mostrou ser bastante benéfico, apresentando valores de melhoria, nas duas misturas, superiores a 50% relativamente à mistura de referência para tensões próximas de 500  $MPa$ .

A tensão no aço quando apareceu a 1ª fenda para cada tirante é apresentada no quadro seguinte. A tensão mais elevada para a abertura da 1ª fenda, na classe CA350, foi verificada no provete T7L\_350Al2%

Quadro 5.4. Tensão de abertura da 1ª fenda para classe CA350 de varões lisos.

Provetes	$\sigma_s$ ( $MPa$ )
T6L_350	100
T7L_350Al2%	198
T8L_350Si2%	100

### **Varões nervurados**

Da análise dos tirantes que continham varões nervurados, é possível verificar, para a classe de betão CA550, que a largura máxima de fendas registada, para valores de tensão próximos de 500  $MPa$ , ocorreu nas misturas que continham nanopartículas. Em ambos os provetes, T2N\_550Al2% e T3N\_550Si2%, foi registado um valor de  $W_{máx}=0,55$   $mm$ . Tendo em atenção que os últimos valores registados da largura de fendas foram realizados para tensões no aço um pouco diferentes, isto é, para o tirante com nanopartículas de alumínio a tensão era 550  $MPa$ , ao passo que o tirante com nanopartículas de sílica a tensão era 425  $MPa$ , pode-se concluir que a incorporação de nanopartículas de sílica é menos benéfica.

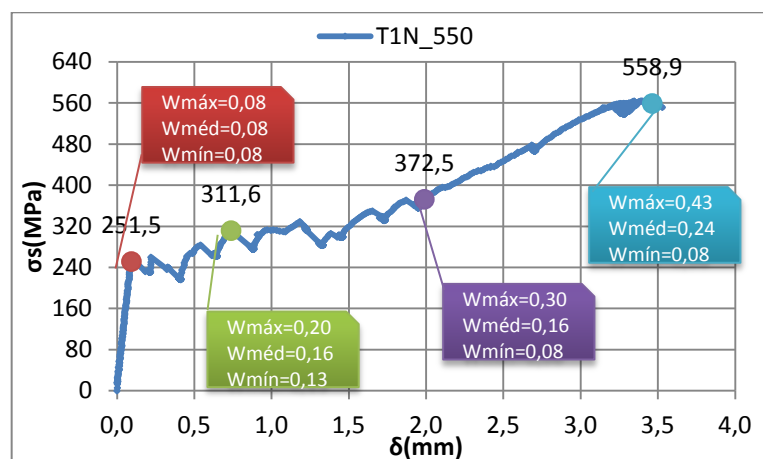


Figura 5.19. Relação tensão no aço – deslocamento do tirante T1N\_550 e registos da largura das fendas ( $w$  em mm) ao longo do ensaio.

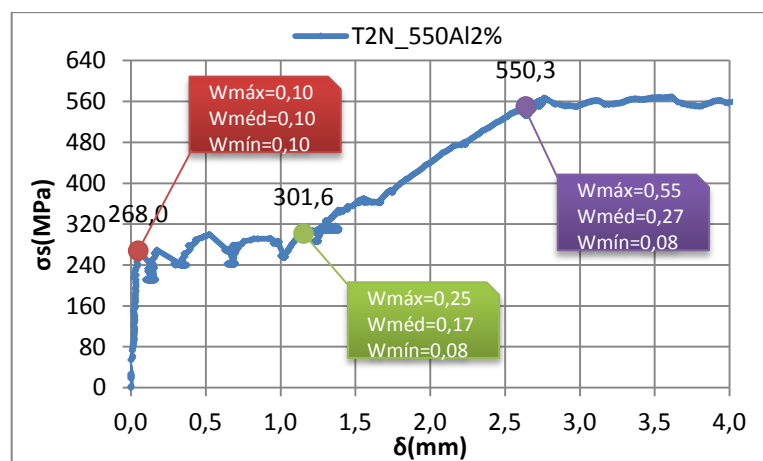


Figura 5.20. Relação tensão no aço – deslocamento do tirante T2N\_550Al2% e registos da largura das fendas ( $w$  em mm) ao longo do ensaio.

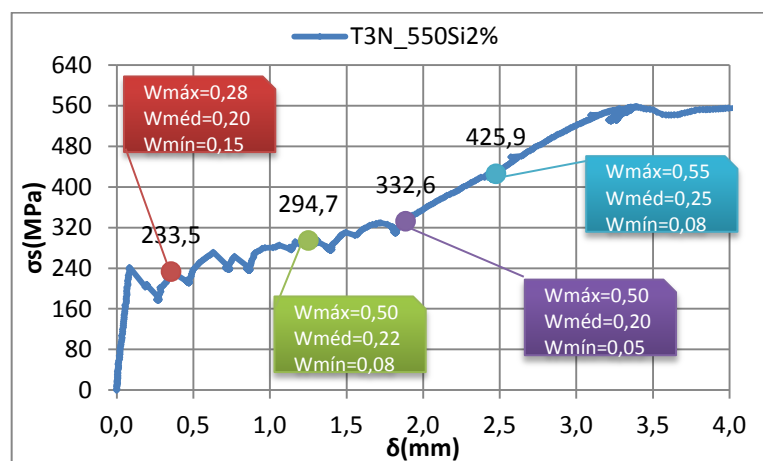


Figura 5.21. Relação tensão no aço – deslocamento do tirante T3N\_550Si2% e registos da largura das fendas ( $w$  em mm) ao longo do ensaio.

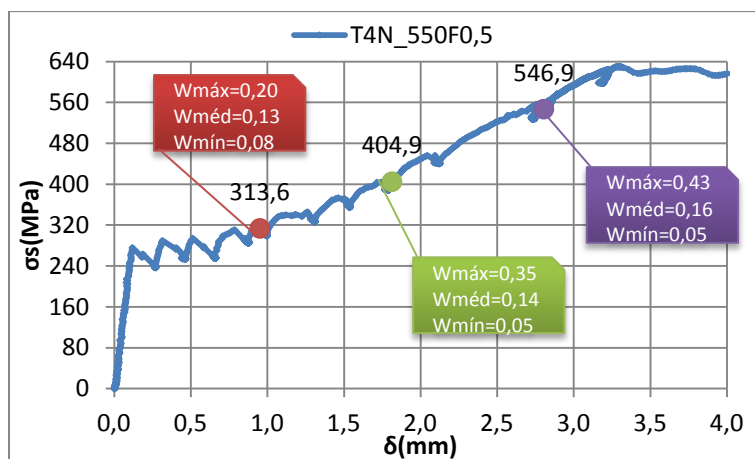


Figura 5.22. Relação tensão no aço – deslocamento do tirante T4N\_550F0,5 e registros da largura das fendas ( $w$  em  $mm$ ) ao longo do ensaio.

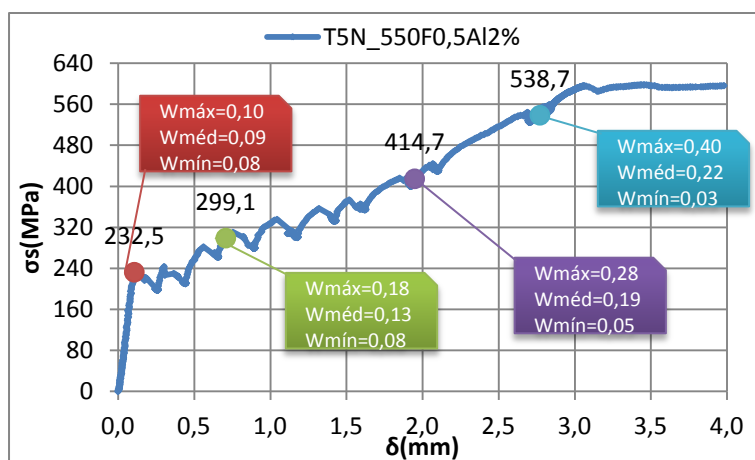


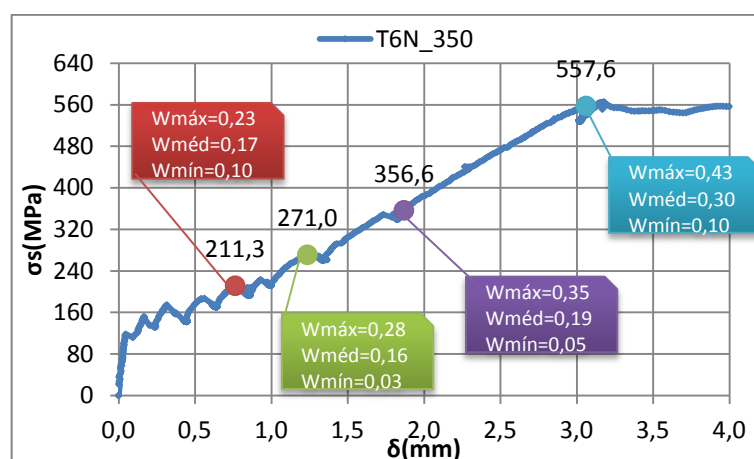
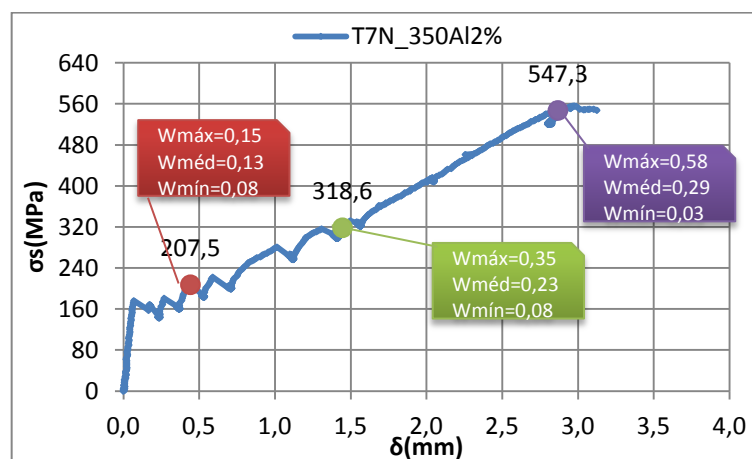
Figura 5.23. Relação tensão no aço – deslocamento do tirante T5N\_550F0,5Al2% e registros da largura das fendas ( $w$  em  $mm$ ) ao longo do ensaio.

O uso de nanopartículas no betão em ambos os tirantes, demonstrou não trazer benefícios, verificando-se, pelo contrário que os resultados piores. Houve um aumento da abertura das fendas, relativamente à mistura de referência de aproximadamente 27,9%. O resultado mais positivo, aconteceu no tirante contendo fibras+aluminio, com um ganho de aproximadamente 7%.

Como apresentado para os varões lisos, também aqui se apresentam os valores da tensão no aço quando apareceu a 1ª fenda, registados para a classe CA550, dando destaque à mistura 550F0,5 como aquela que apresenta maior tensão para a primeira fenda.

Quadro 5.5. Tensão de abertura da 1ª fenda para classe CA550 de varões nervurados.

Provetes	$\sigma_s$ (MPa)
T1N_550	251
T2N_550Al2%	268
T3N_550Si2%	241
T4N_550F0,5	275
T5N_550F0,5Al2%	233

Figura 5.24. Relação tensão no aço – deslocamento do tirante T6N\_350 e registos da largura das fendas ( $w$  em mm) ao longo do ensaio.Figura 5.25. Relação tensão no aço – deslocamento do tirante T7N\_350Al2% e registos da largura das fendas ( $w$  em mm) ao longo do ensaio.

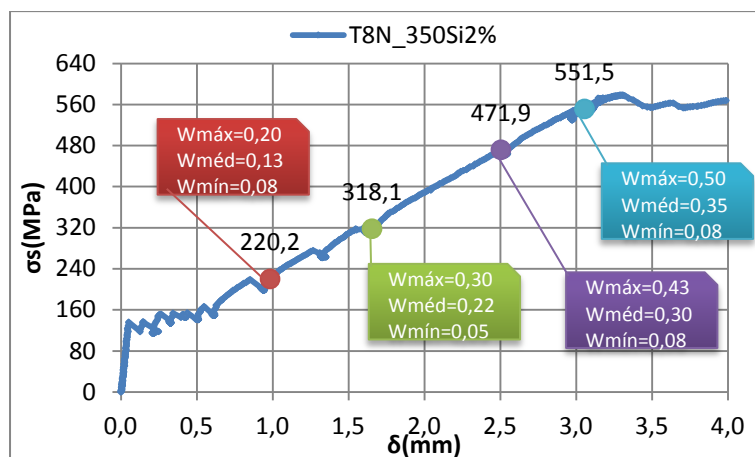


Figura 5.26. Relação tensão do aço – deslocamento do tirante T8N\_350Si2% e registos da largura das fendas ( $w$  em mm) ao longo do ensaio.

Ao contrário do que aconteceu com os varões lisos, o uso de nanopartículas em misturas da classe CA350 com varões nervurados mostraram, relativamente à mistura de referência, ter pouco impacto. Para tensões no aço, relativamente próximas, os provetes com nanopartículas apresentaram, respetivamente, T7N\_350Al2% e T8N350Si2% os seguintes resultados  $w_{\max}=0,58$  mm e  $w_{\max}=0,50$  mm. Novamente verificou-se que os resultados da incorporação de nanopartículas de alumínio não era muito favorável. A largura das fendas foi maior, em relação ao tirante sem nanopartículas, 34,8% no provete com nanopartículas de alumínio e 16,3% no provete com nanopartículas de sílica.

Mais uma vez apresentam-se os valores da tensão no aço quando se forma a 1ª fenda em cada tirante. O tirante com nanopartículas de alumínio foi o que teve a tensão no aço mais elevada aquando da formação da 1ª fenda mas também foi o que apresentou a largura máxima de fenda mais elevada.

Quadro 5.6. Tensão de abertura da 1ª fenda para classe CA350 de varões nervurados.

Misturas	$\sigma_s$ (MPa)
350	118
350Al2%	176
350Si2%	136



### 5.2.2 Padrão de fendilhação

A compreensão do padrão de fendilhação resultante do esforço de tração aplicado ao tirante de betão, passa pela análise não só da largura das fendas, mas também do espaçamento entre as mesmas. É unânime (o próprio EC2 assim o prevê), que é desejável numa peça de betão fendilhada o espaçamento entre fendas ser o menor possível. Isto, acontece para se obter, por consequência direta, menor largura de fendas, diminuindo assim a área exposta das armaduras no interior do betão.

Com base no trabalho laboratorial realizado, foi possível traçar detalhadamente o padrão de fendilhação dos tirantes, incluindo a distância entre as fendas nas quatro faces de cada provete.

#### Varões lisos

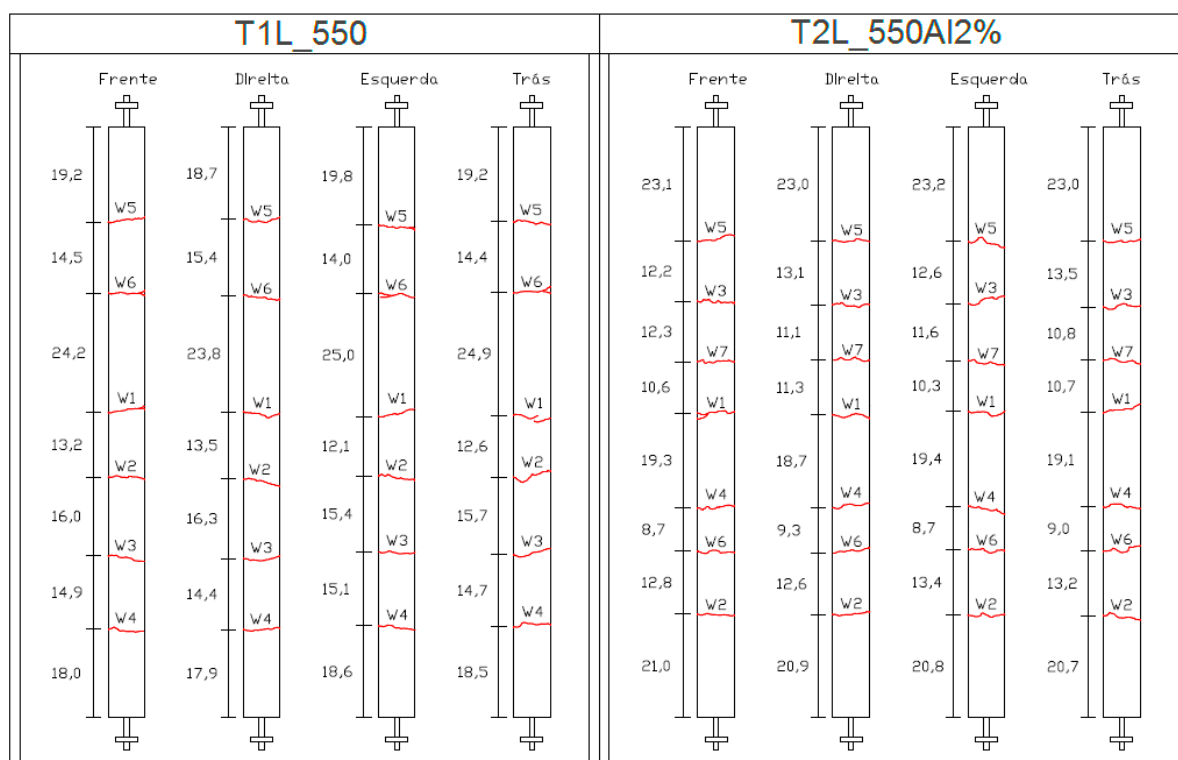


Figura 5.27. Padrão de fendilhação e distância entre fendas (cm) nas quatro faces dos provetes T1L\_550 e T2L\_550A12%.

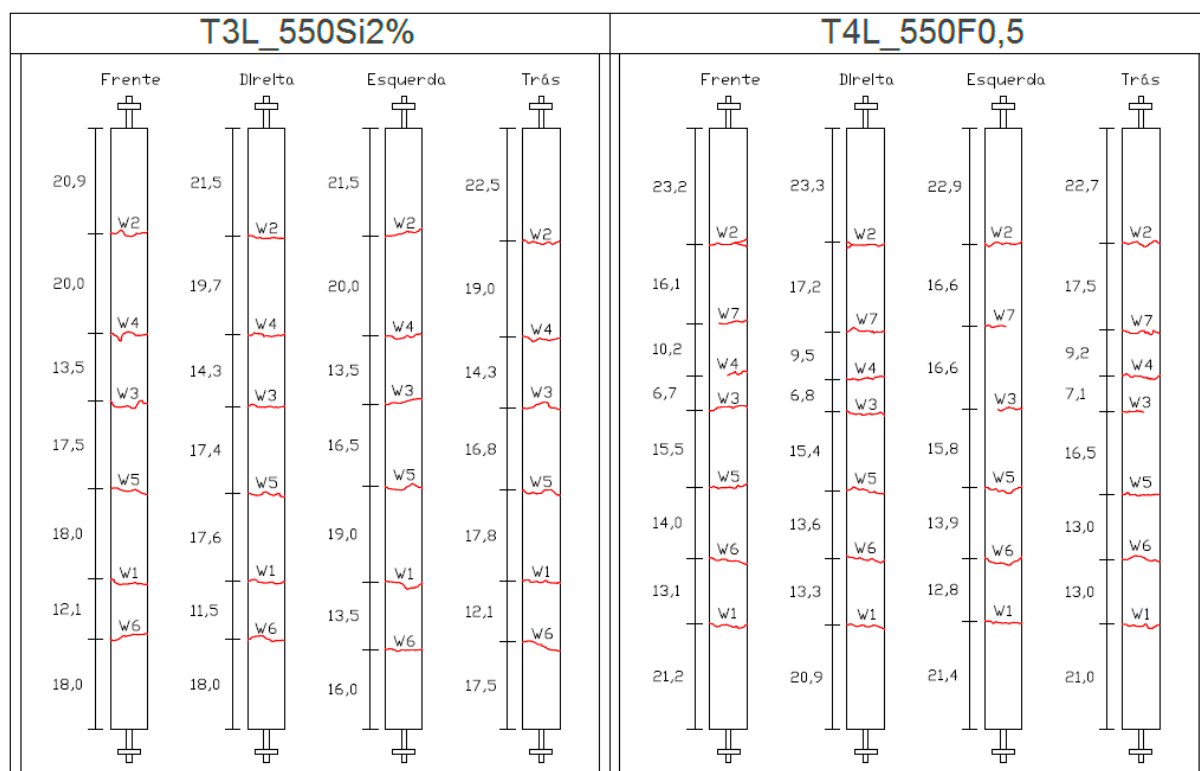


Figura 5.28. Padrão de fendilhação e distância entre fendas (cm) nas quatro faces dos provetes T3L\_550Si2% e T4L\_550F0,5.

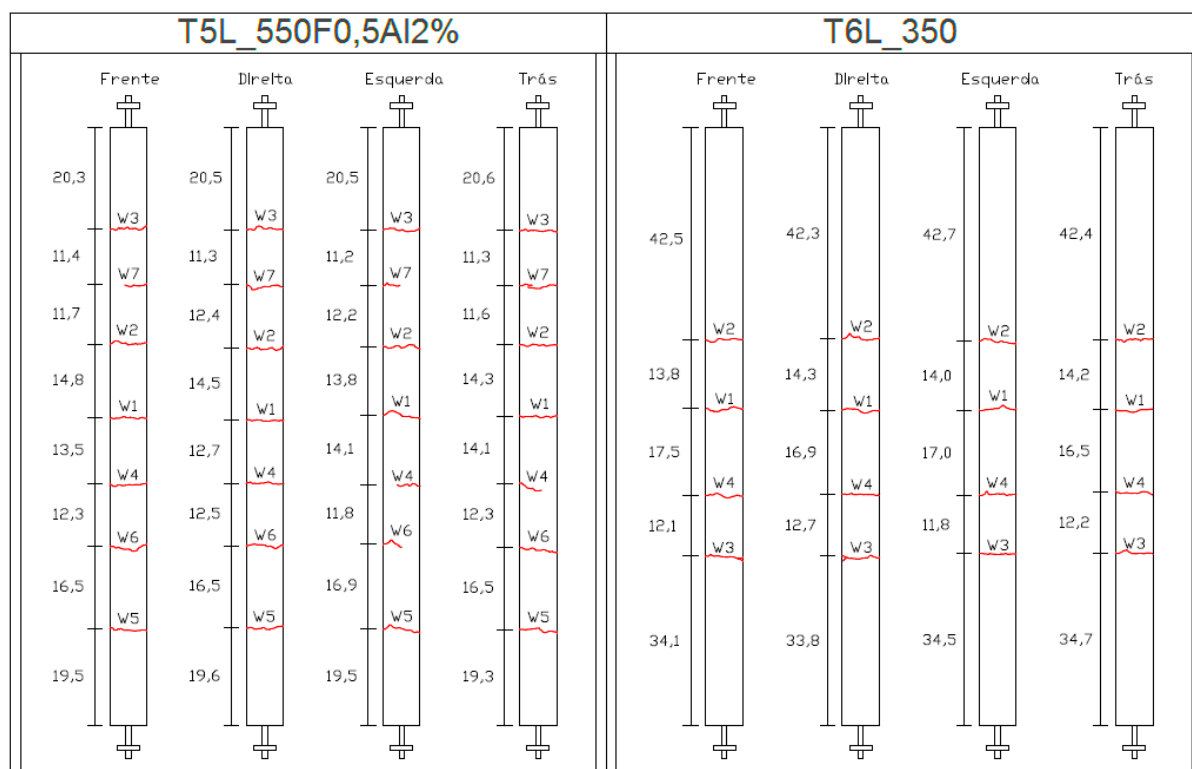


Figura 5.29. Padrão de fendilhação e distância entre fendas (cm) nas quatro faces dos provetes T5L\_550F0,5Al2% e T6L\_350.

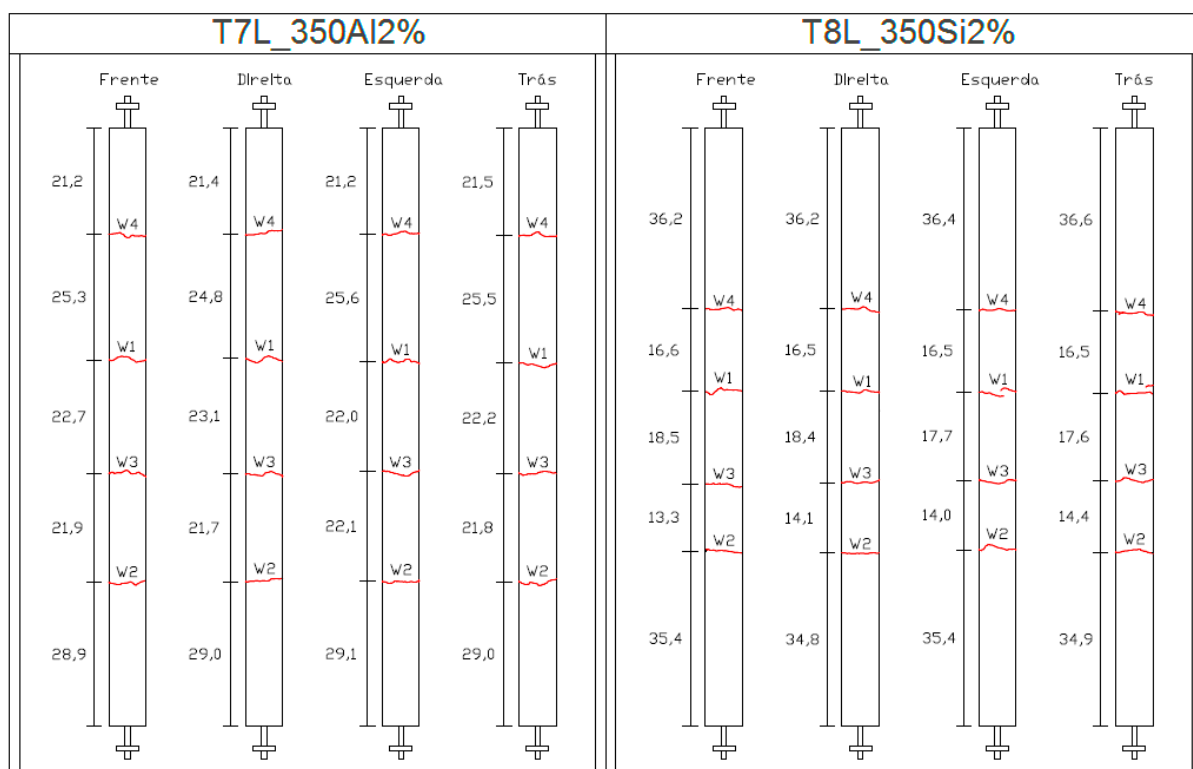


Figura 5.30. Padrão de fendilhação e distância entre fendas (cm) nas quatro faces dos provetes T7L\_350Al2% e T8L\_350Si2%.

Como esperado, nos varões lisos, os maiores espaçamentos entre fendas, foram obtidos para a classe CA350. Estes ocorreram nos provetes T6L\_350 com um valor de 42,5 cm. Este facto é explicado pela mais baixa resistência que o betão tem nesta classe. Também o tirante T8L\_350Si2% apresentou um valor elevado para o espaçamento entre fendas (36,4 cm), o maior de entre aqueles que continham nanopartículas nesta classe de betão.

Para a classe CA550, o espaçamento máximo obtido obteve-se no provete T1L\_550, com um valor de 24,5 cm. O valor mais baixo ocorreu no provete T5L\_550F0,5Al2%, com um valor de 20,5 cm, justificado, como esperado, pelas características resistentes que as fibras dão ao betão, elevando a capacidade de aderência. Este provete vem confirmar a teoria, que afirma que quanto mais aderência existir, maior será o número de fendas e menor o espaçamento entre elas.

Há ainda a salientar que os provetes da classe CA350, de uma forma esperada, tiveram um número reduzido de fendas, nos três provetes desta classe o número de fendas foi de 4. Em combinação com os espaçamentos já analisados, pode-se concluir que os provetes desta classe de betão são os que apresentam o maior espaçamento entre fendas. Tendo como base a relação espaçamento das fendas e o número de fendas, é legítimo concluir que o provete que melhor comportamento apresentou (recorde-se que o melhor comportamento é aquele que apresenta o menor espaçamento e maior número de fendas porque assim, à partida, as fendas têm menores larguras), foi T5L\_550F0,5Al2%, com 7 fendas e um espaçamento de 20,5 cm.

No geral o uso de nanopartículas nas misturas de betão, quanto a este tipo de análise e para a série dos varões lisos, demonstrou trazer benefícios relativamente aos provetes de referência, como mostra o Quadro 5.7, onde os provetes com nanopartículas reúnem valores médios de espaçamento de fendas menores que os de referência. No quadro seguinte mostra-se os resultados globais do espaçamento entre fendas: i) máximo, ii) médio, iii) mínimo e iv) número de fendas.

Quadro 5.7. Quadro resumo do espaçamento máximo, médio, mínimo e número de fendas para os provetes com varões lisos.

Provetes	Espaçamento mínimo (cm)	Espaçamento médio (cm)	Espaçamento máximo (cm)	Número de fendas
T1L_550	12,9	18,7	24,5	6
T2L_550A12%	8,9	16,0	23,1	7
T3L_550Si2%	12,3	17,0	21,6	6
T4L_550F0,5	6,9	14,9	23,0	7
T5L_550F0,5A12%	11,3	15,9	20,5	7
T6L_350	12,2	27,3	42,5	4
T7L_350A12%	21,3	25,2	29,0	4
T8L_350Si2%	14,0	25,2	36,4	4

#### Varões nervurados

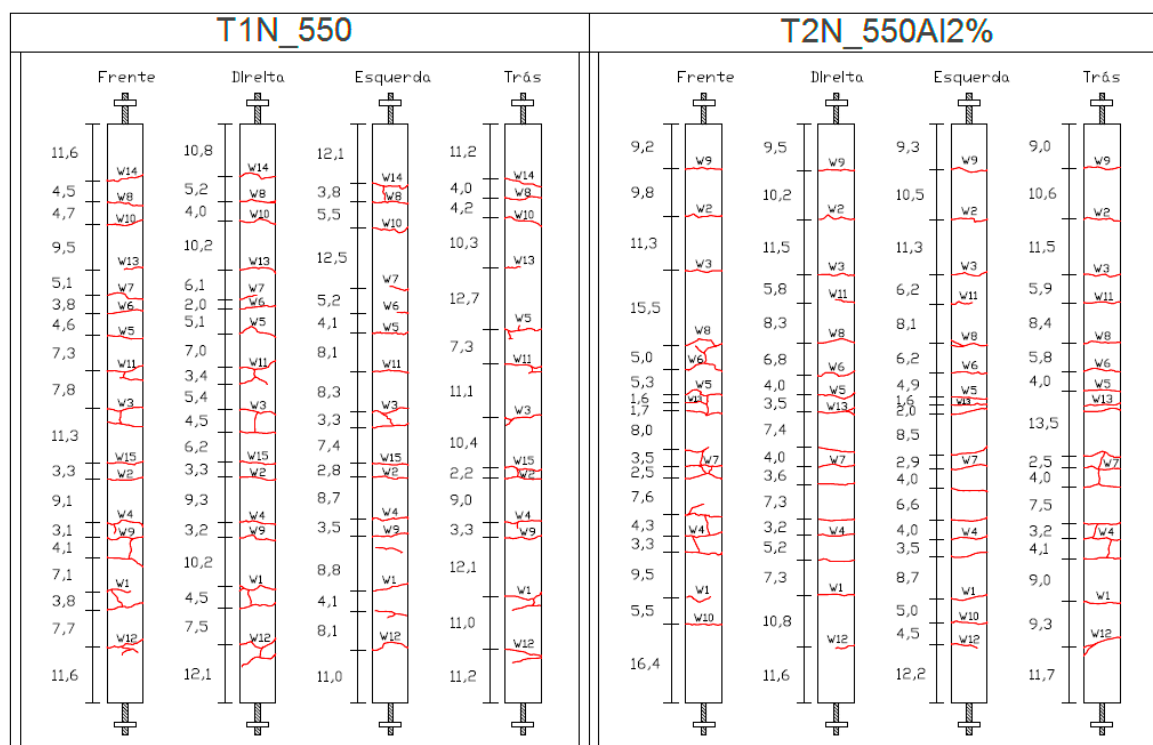


Figura 5.31. Padrão de fendilhação e distância entre fendas (cm) nas quatro faces dos provetes T1N\_550 e T2N\_550A12%.

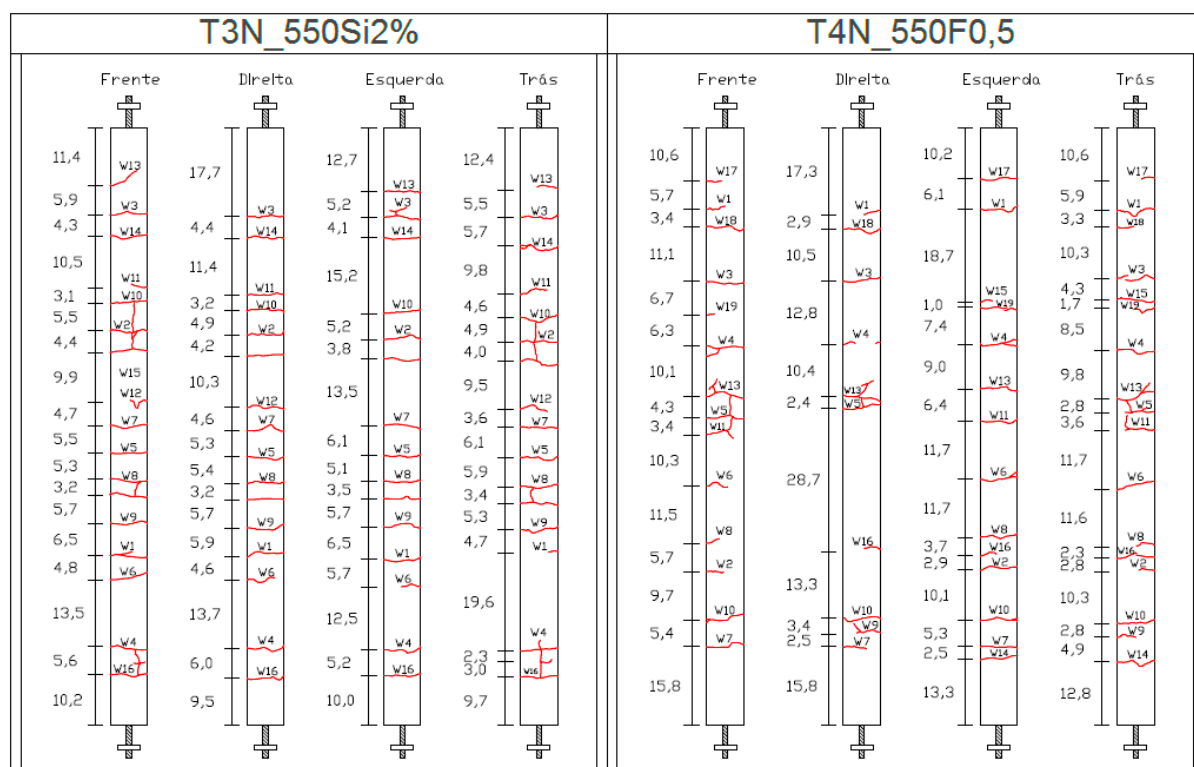


Figura 5.32. Padrão de fendilhação e distância entre fendas (cm) nas quatro faces dos provetes T3N\_550Si2% e T4N\_550F0,5.

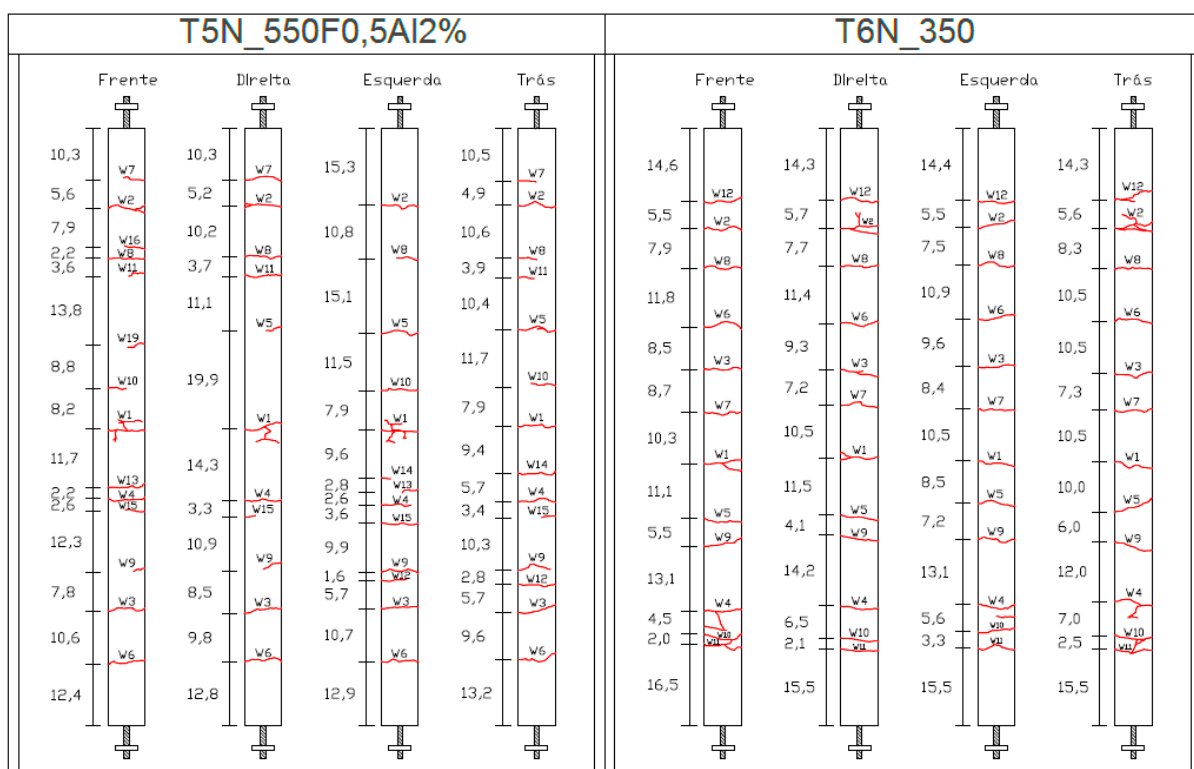


Figura 5.33. Padrão de fendilhação e distância entre fendas (cm) nas quatro faces dos provetes T5N\_550F0,5Al2% e T6N\_350.

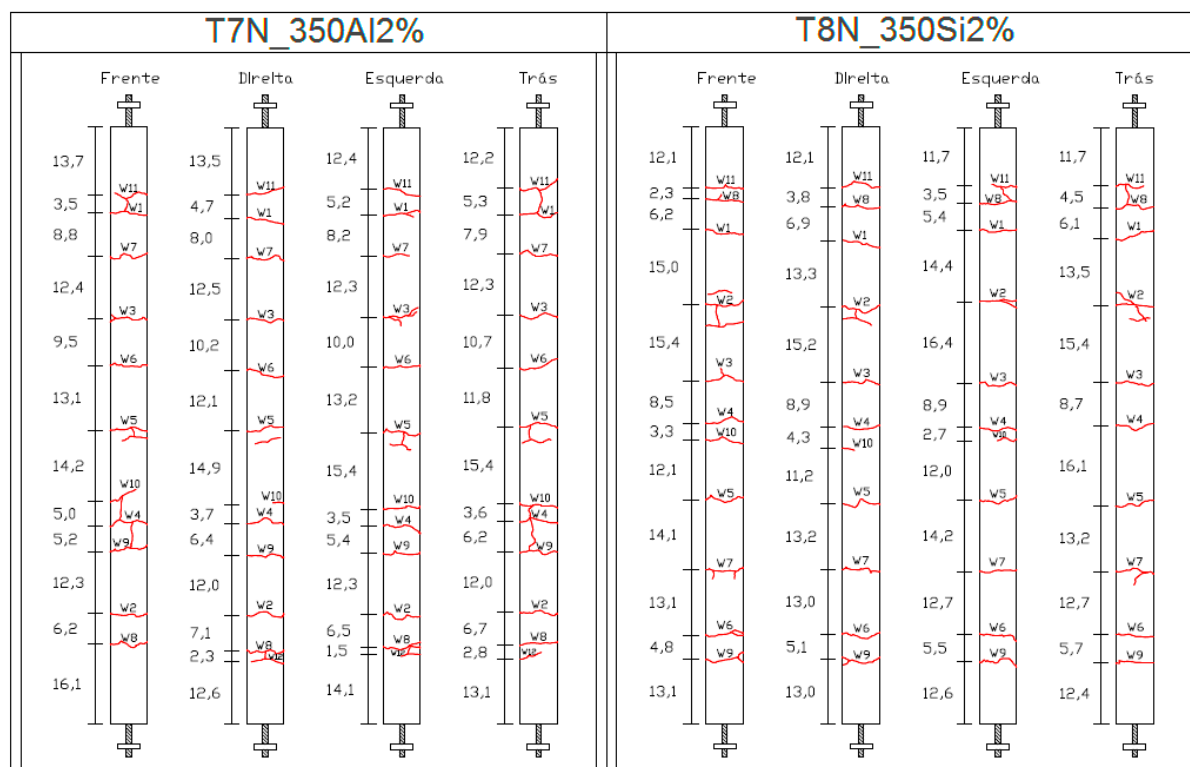


Figura 5.34. Padrão de fendilhação e distância entre fendas (cm) nas quatro faces dos provetes T7N\_350Al2% e T8N\_350Si2%.

Com o uso de varões nervurados, verificou-se um aumento do número de fendas, reduzindo o espaçamento entre cada fenda, mostrando melhorias significativas relativamente aos varões lisos.

Pela análise do padrão de fendilhação para varões nervurados apresentado anteriormente, é possível verificar que o menor espaçamento entre fendas recai novamente no tirante com a mistura de fibras+alumínio (T5N\_550F0,5Al2%), com um valor de 14,4 cm. Por outro lado, o valor mais elevado do espaçamento entre fendas ocorreu no provete T3N\_550Si2%, apresentando um valor na ordem dos 18,6 cm.

A diferença entre as classes CA350 e CA550, com varões nervurados, não se tornou tão significativa como nos varões lisos, conseguindo em alguns casos a classe CA350 obter melhores resultados em termos de espaçamento de fendas.

Na análise sobre o efeito das nanopartículas, é seguro afirmar que no geral o seu uso não influenciou significativamente o comportamento dos provetes relativamente aos provetes de referência, uma vez que os espaçamentos máximos obtidos, relacionados com o número de fendas, foram todos muito próximos.

Observando o Quadro 5.8, é possível afirmar que os únicos valores mais discrepantes são dos provetes com nanopartículas de sílica, apresentando valores médios do espaçamento entre fendas elevados, relativamente à referência.

Quadro 5.8. Quadro resumo do espaçamento máximo, médio, mínimo e número de fendas para os provetes com varões nervurados.

Provetes	Espaçamento mínimo (cm)	Espaçamento médio (cm)	Espaçamento máximo (cm)	Número de fendas
T1N_550	2,9	8,7	14,5	15
T2N_550Al2%	2,5	8,5	14,5	13
T3N_550Si2%	3,6	11,1	18,6	16
T4N_550F0,5	1,4	9,0	16,6	19
T5N_550F0,5Al2%	3,2	8,8	14,4	19
T6N_350	2,5	9,1	15,8	12
T7N_350Al2%	2,2	8,6	15,0	12
T8N_350Si2%	3,4	9,5	15,6	11

### 5.2.3 Gráficos de resumo dos ensaios de tirantes

Na tentativa de resumir toda a informação registada durante o ensaio experimental de cada tirante, apresentam-se figuras para cada provete com toda a informação. Procurou-se apresentar essa informação de uma forma que facilite a sua rápida compreensão e complemente o que já foi apresentado.

Nos gráficos seguintes, uma parte da informação disponibilizada, prende-se com a informação relativa à evolução da largura de cada fenda ao longo de todo o ensaio (estes valores estão no eixo das ordenadas). Associado à evolução da largura das fendas será exibida a carga correspondente a cada ponto (estes valores estão no eixo das abcissas). A utilização de “minigráficos” ligados a cada fenda, expõe assim o comportamento da fenda em cada face do tirante (frente, direita, esquerda e trás).

Com os valores finais atingidos em cada face do provete para cada fenda, realizou-se o cálculo da média aritmética da largura das fendas nas 4 faces. Na mesma imagem, esses valores médios, são expostos através da coloração do provete central, utilizando para isso uma escala colorida devidamente escalonada com vários intervalos para a largura das fendas. Isto, deixa visível de forma rápida o comportamento de todo o tirante relativamente aos pontos de maior abertura de fendas, bem como aqueles onde o provete não sofreu alterações.

## Varões lisos

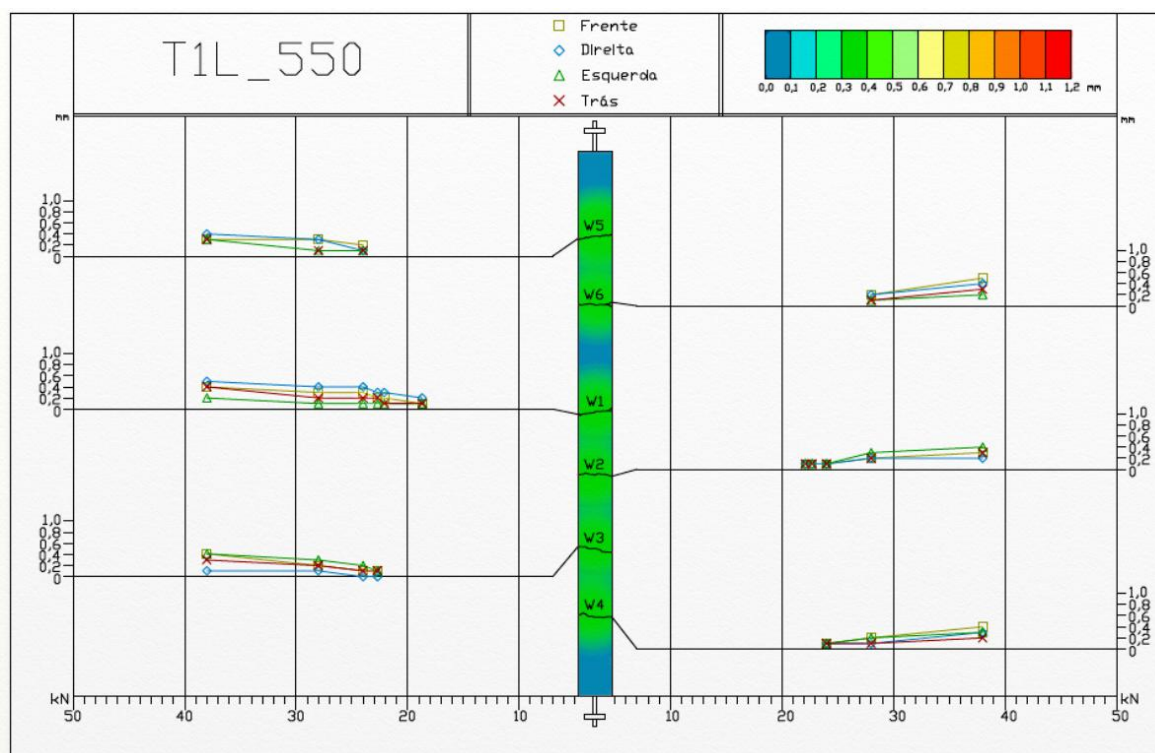


Figura 5.35. Evolução da largura de cada fenda (nas quatro faces) ao longo do ensaio e escala colorida relativamente à média final da largura de cada fenda do provete T1L\_550.

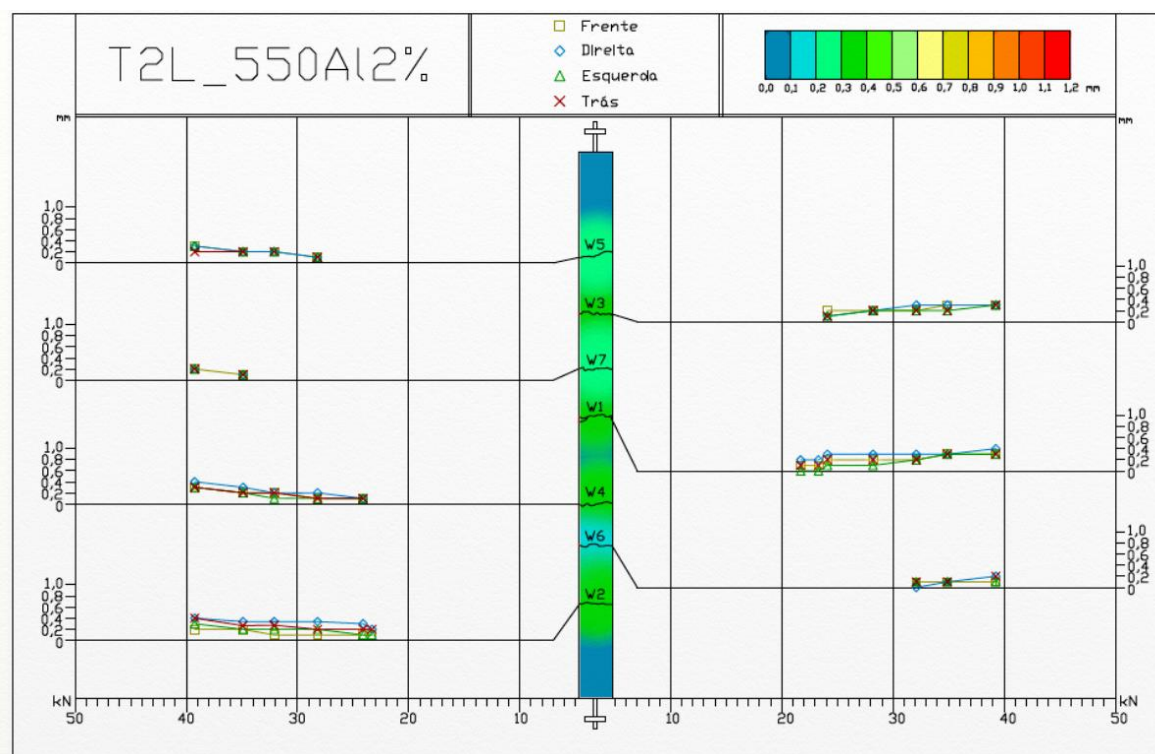


Figura 5.36. Evolução da largura de cada fenda (nas quatro faces) ao longo do ensaio e escala colorida relativamente à média final da largura de cada fenda do provete T2L\_550A12%.



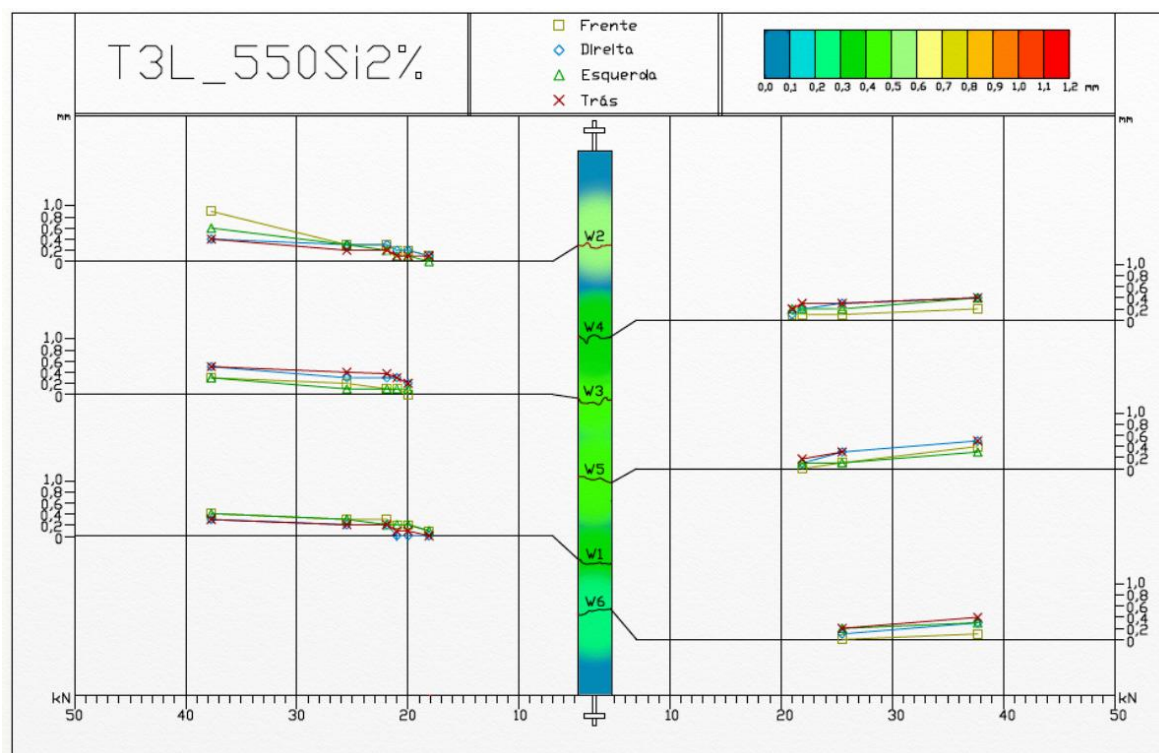


Figura 5.37. Evolução da largura de cada fenda (nas quatro faces) ao longo do ensaio e escala colorida relativamente à média final da largura de cada fenda do provete T3L\_550Si2%.

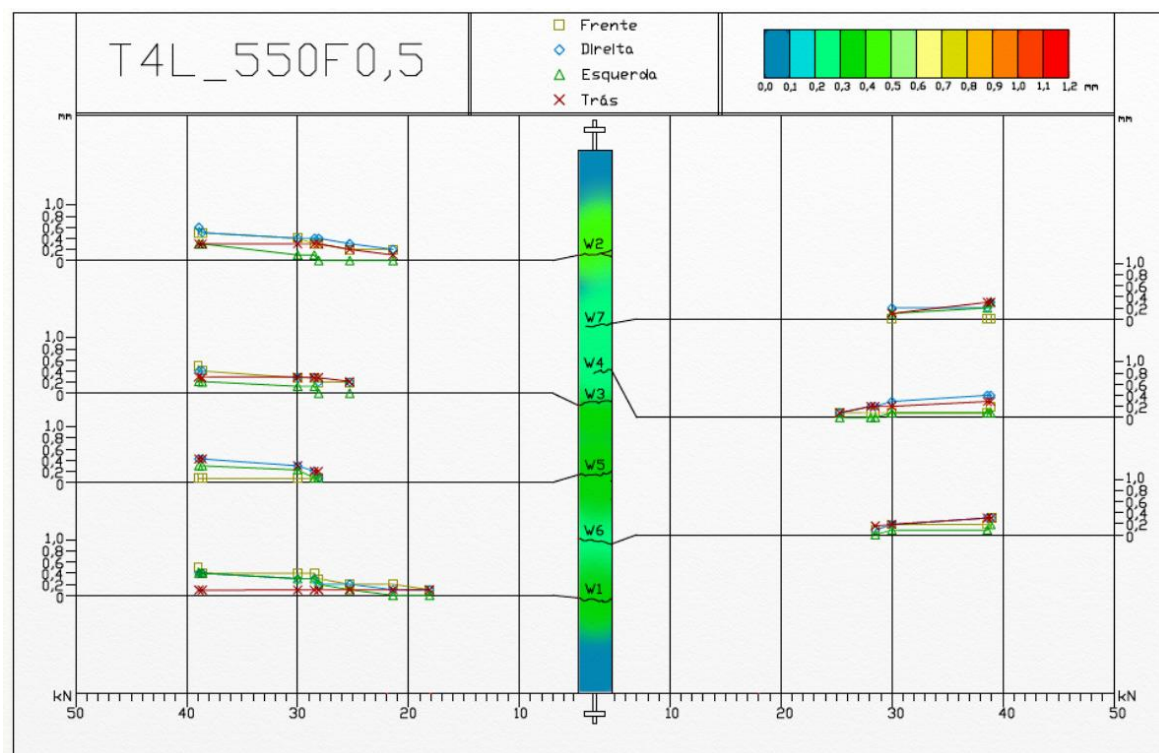


Figura 5.38. Evolução da largura de cada fenda (nas quatro faces) ao longo do ensaio e escala colorida relativamente à média final da largura de cada fenda do provete T4L\_550F0,5.

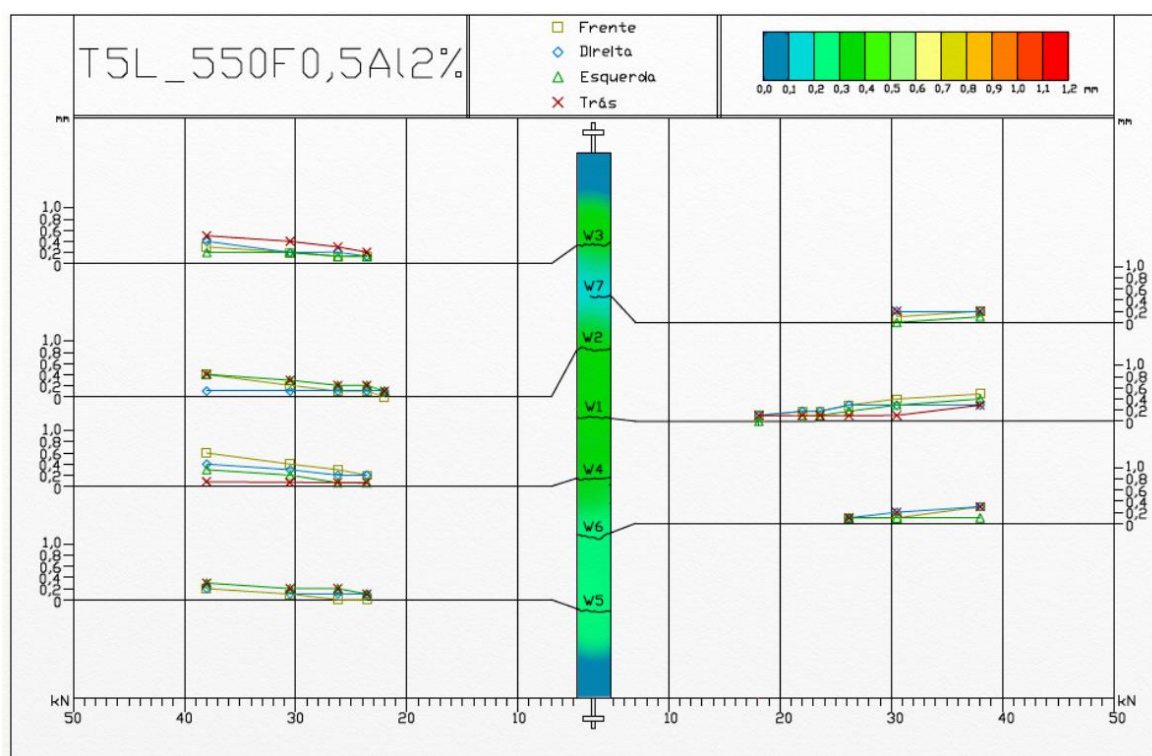


Figura 5.39. Evolução da largura de cada fenda (nas quatro faces) ao longo do ensaio e escala colorida relativamente à média final da largura de cada fenda do provete T5L\_550F0,5Al2%.

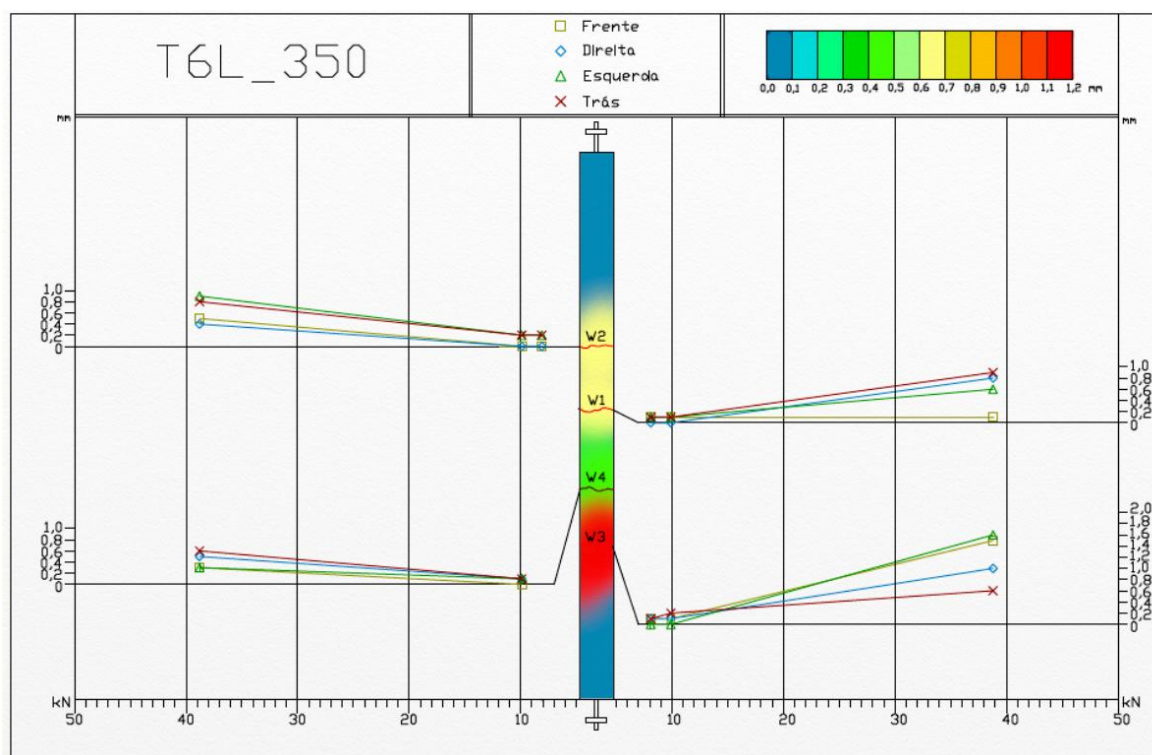


Figura 5.40. Evolução da largura de cada fenda (nas quatro faces) ao longo do ensaio e escala colorida relativamente à média final da largura de cada fenda do provete T6L\_350.

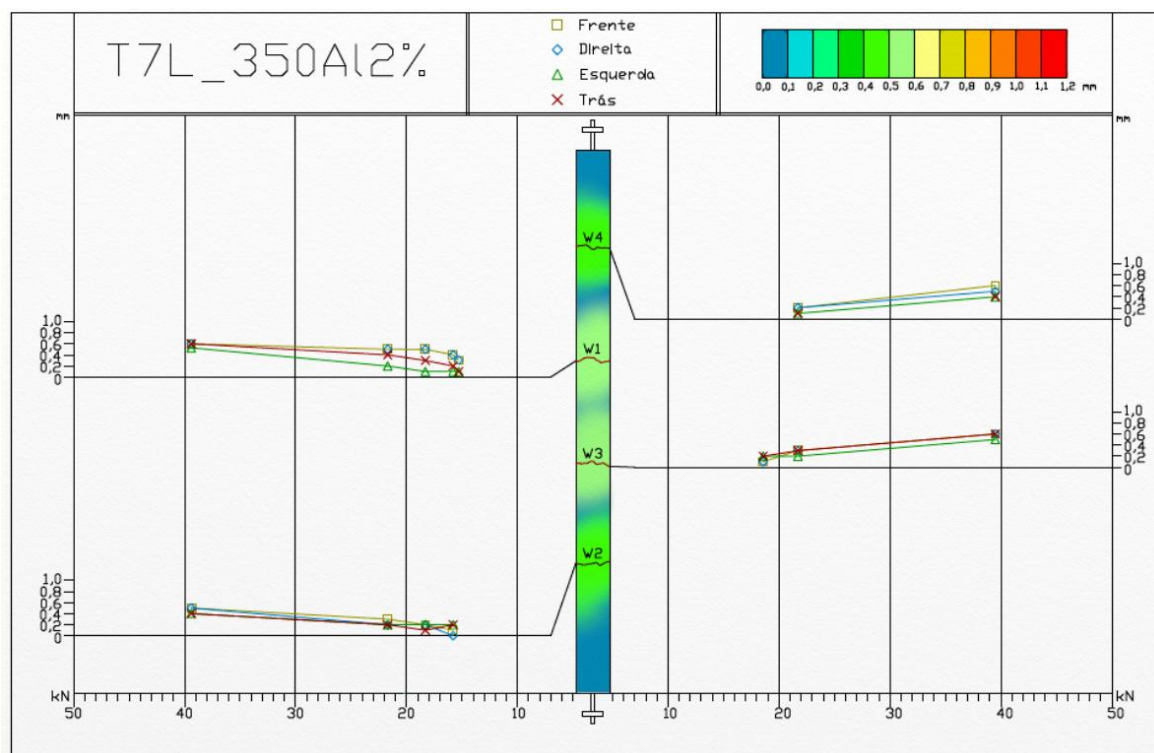


Figura 5.41. Evolução da largura de cada fenda (nas quatro faces) ao longo do ensaio e escala colorida relativamente à média final da largura de cada fenda do provete T7L\_350Al2%.

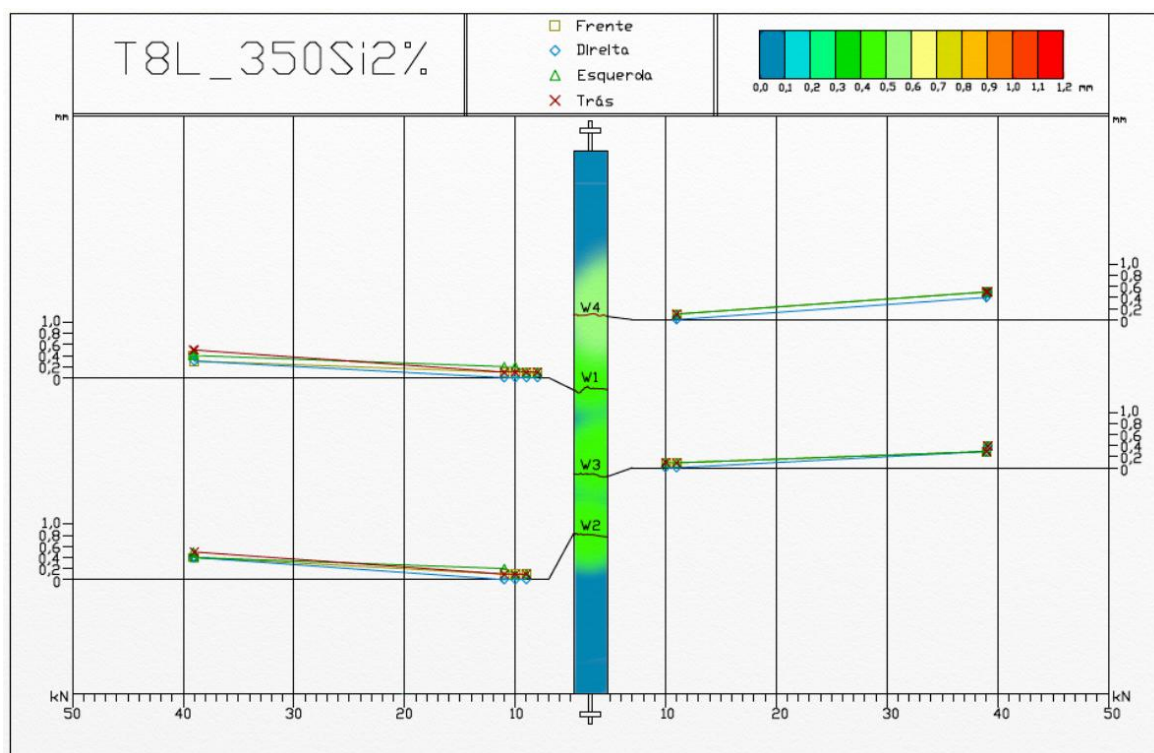


Figura 5.42. Evolução da largura de cada fenda (nas quatro faces) ao longo do ensaio e escala colorida relativamente à média final da largura de cada fenda do provete T8L\_350Si2%.



## Varões nervurados

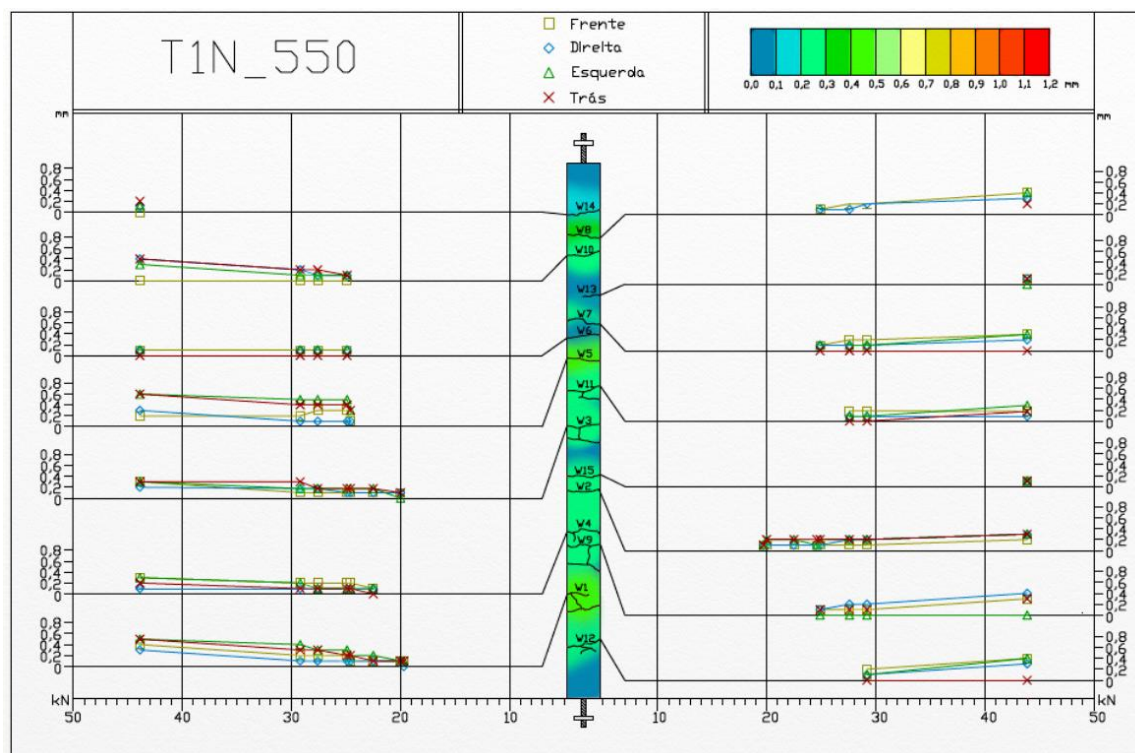


Figura 5.43. Evolução da largura de cada fenda (nas quatro faces) ao longo do ensaio e escala colorida relativamente à média final da largura de cada fenda do provete T1N\_550.

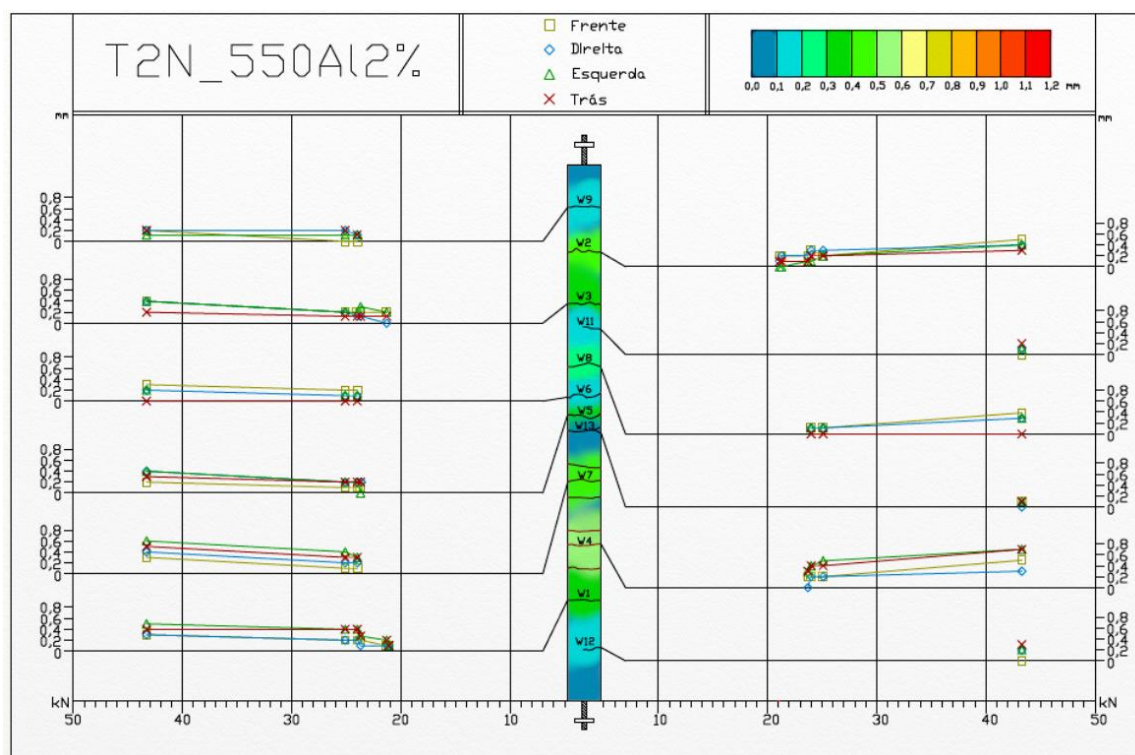


Figura 5.44. Evolução da largura de cada fenda (nas quatro faces) ao longo do ensaio e escala colorida relativamente à média final da largura de cada fenda do provete T2N\_550Al2%.

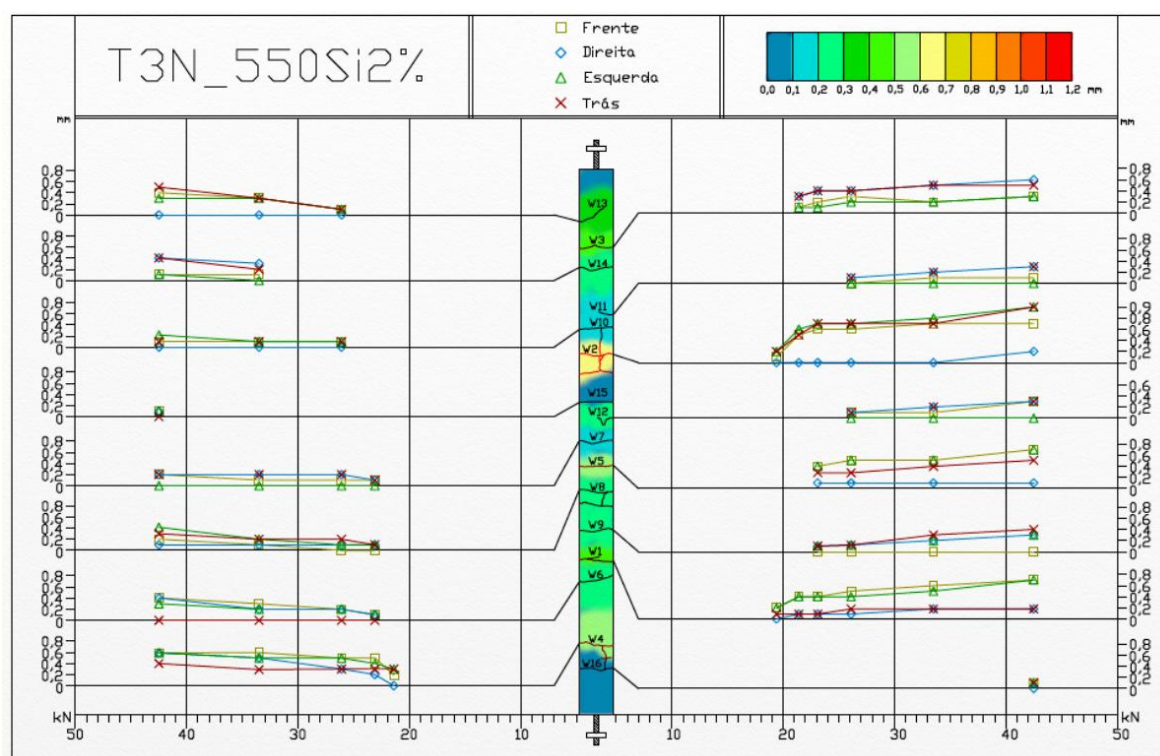


Figura 5.45. Evolução da largura de cada fenda (nas quatro faces) ao longo do ensaio e escala colorida relativamente à média final da largura de cada fenda do provete T3N\_550Si2%.

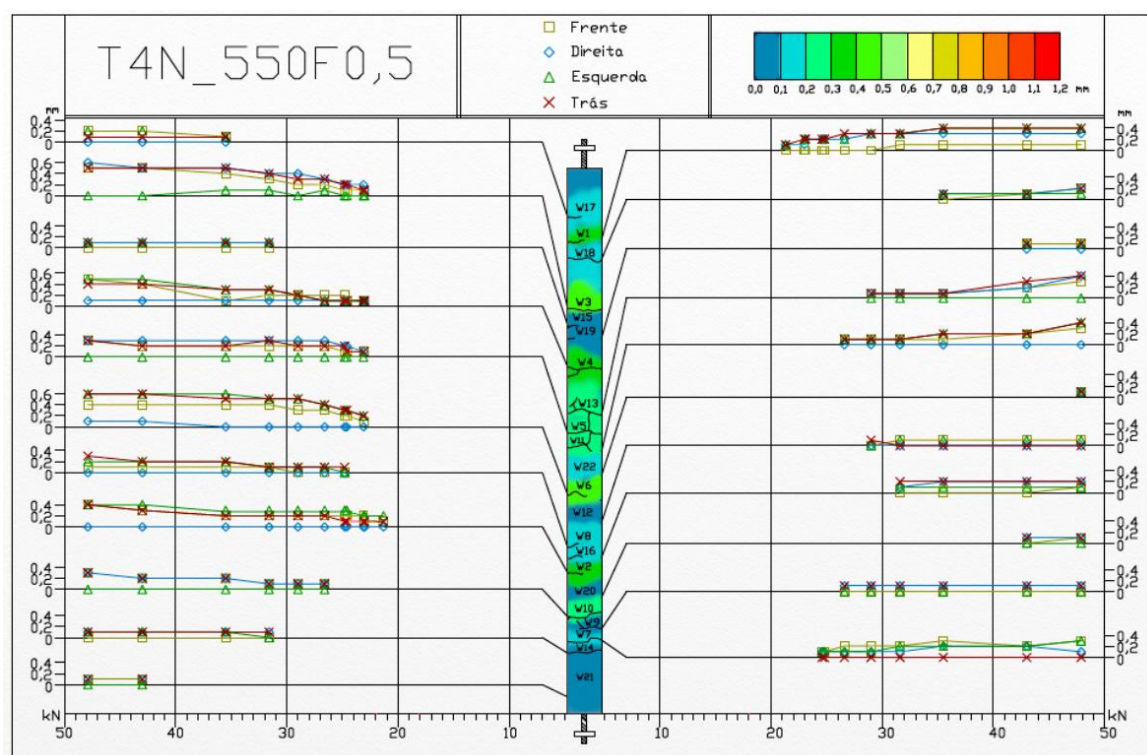


Figura 5.46. Evolução da largura de cada fenda (nas quatro faces) ao longo do ensaio e escala colorida relativamente à média final da largura de cada fenda do provete T4N\_550F0,5.



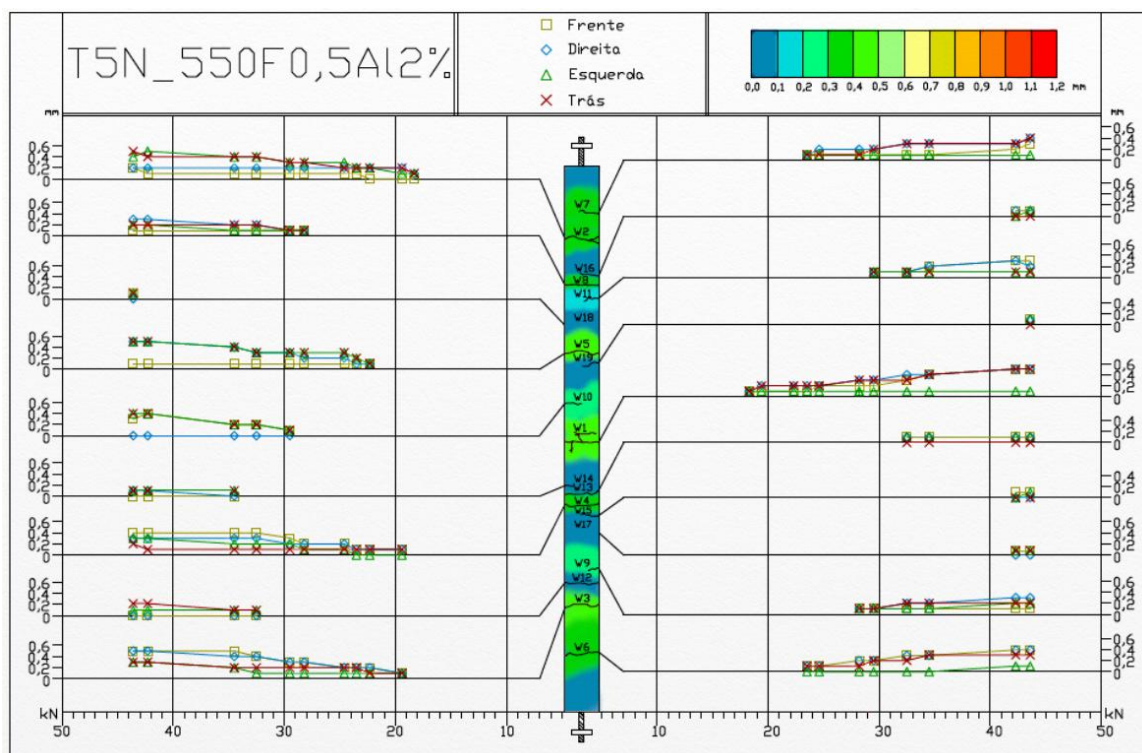


Figura 5.47. Evolução da largura de cada fenda (nas quatro faces) ao longo do ensaio e escala colorida relativamente à média final da largura de cada fenda do provete T5N\_550F0,5Al2%.

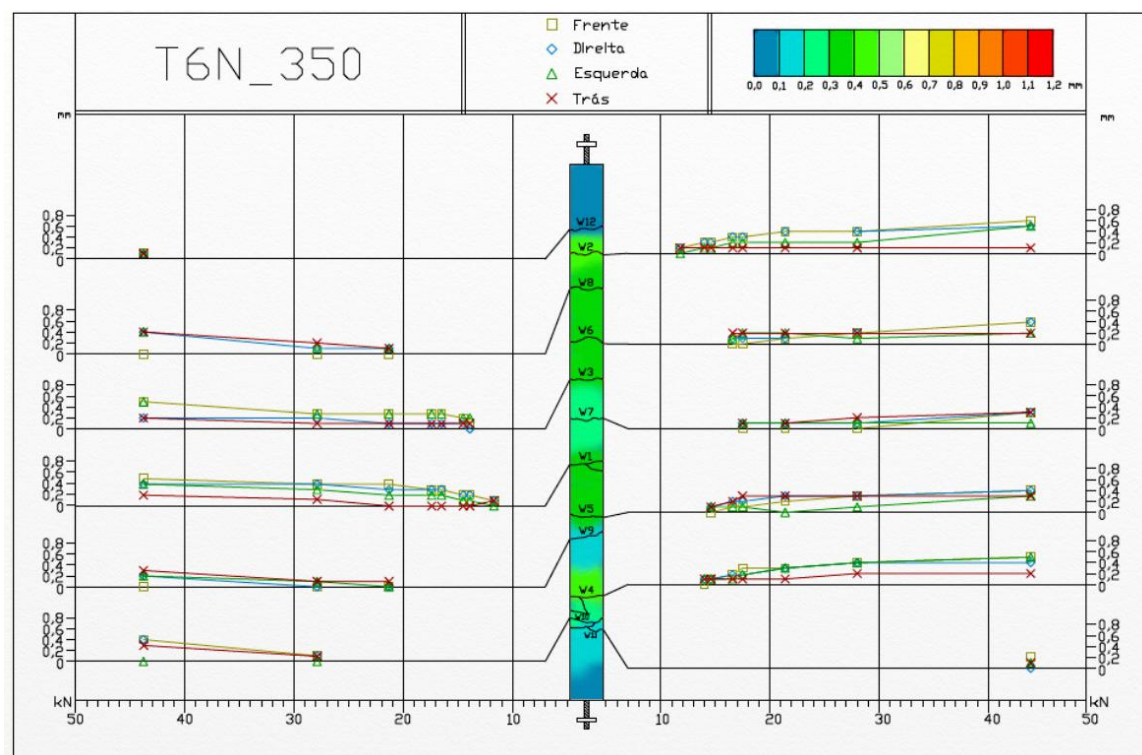


Figura 5.48. Evolução da largura de cada fenda (nas quatro faces) ao longo do ensaio e escala colorida relativamente à média final da largura de cada fenda do provete T6N\_350.

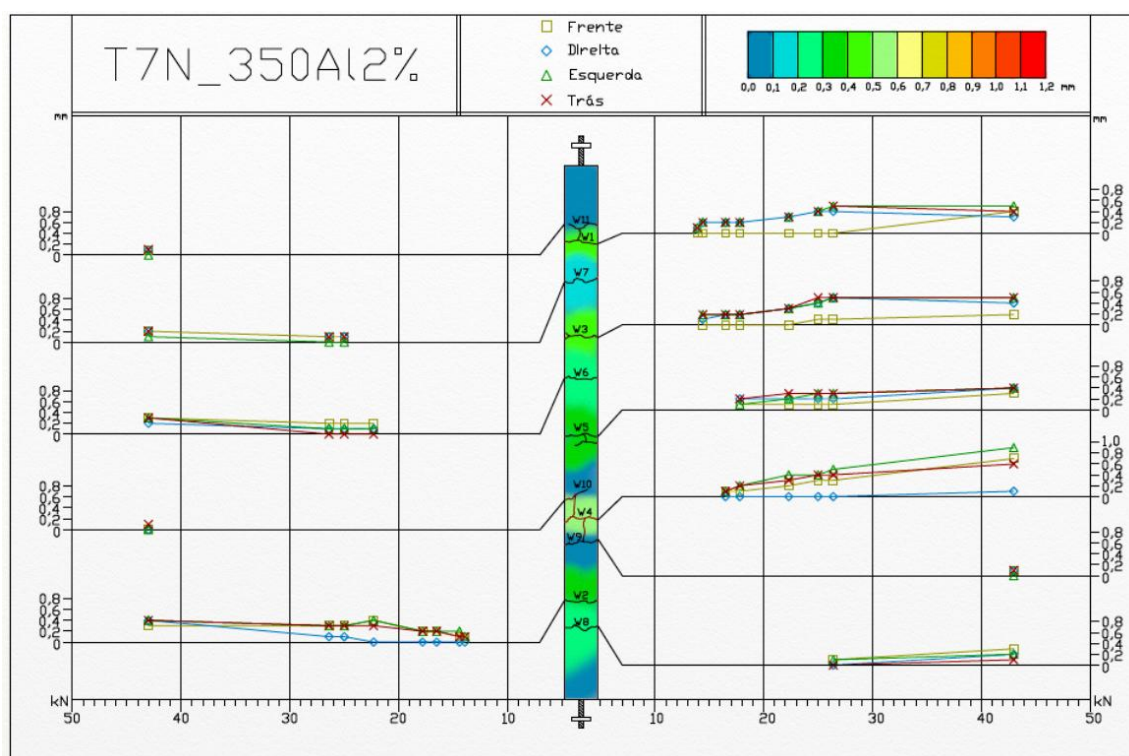


Figura 5.49. Evolução da largura de cada fenda (nas quatro faces) ao longo do ensaio e escala colorida relativamente à média final da largura de cada fenda do provete T7N\_350Al2%.

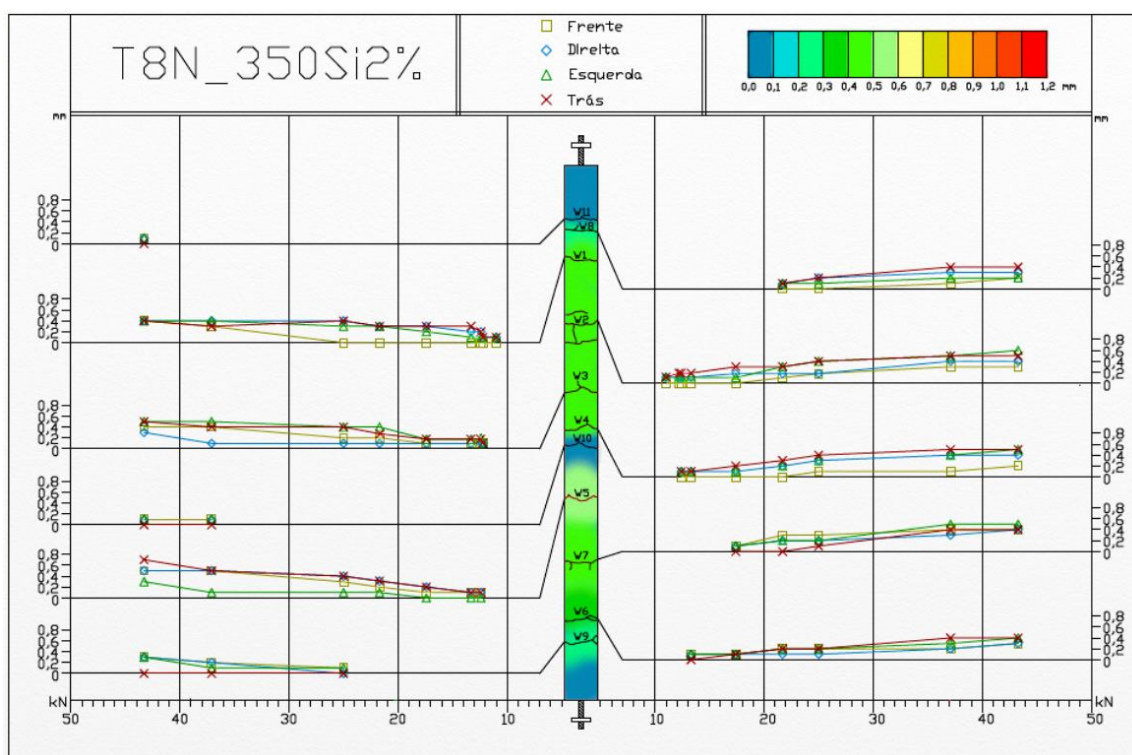


Figura 5.50. Evolução da largura de cada fenda (nas quatro faces) ao longo do ensaio e escala colorida relativamente à média final da largura de cada fenda do provete T8N\_350Si2%.

### 5.3 Comparação de valores entre os dois ensaios

Uma vez que ambos os ensaios (ensaios *Pull Out* e ensaios de tração de tirantes) decorreram com o mesmo tipo de misturas, ou seja, com as mesmas características, tanto ao nível do betão (mesmas dosagens de cimento e adições), bem como no uso de varões, é possível estabelecer uma relação entre os resultados destes dois tipos de ensaios.

Um raciocínio lógico possível de se fazer, prende-se com a análise de que quanto menor for a tensão máxima de aderência obtida numa mistura menor será a capacidade da peça de betão resistir à fendilhação, ou seja, maior será o espaçamento entre fendas e consequentemente também a largura de fendas serão maiores.

É possível observar, na Figura 5.51, relativamente aos varões lisos, que os resultados obtidos seguem esta tendência. A mistura CA350 que apresenta a menor tensão de aderência é aquela que apresenta também o maior espaçamento máximo entre fendas. Posto isto, pode-se afirmar que as misturas CA550\_Si2% e CA550\_F0,5Al2%, numa análise conjunta dos dois ensaios, apresentam os melhores resultados gerais, uma vez que mostraram ter um espaçamento entre fendas menor em conjunto com uma tensão de aderência alta.

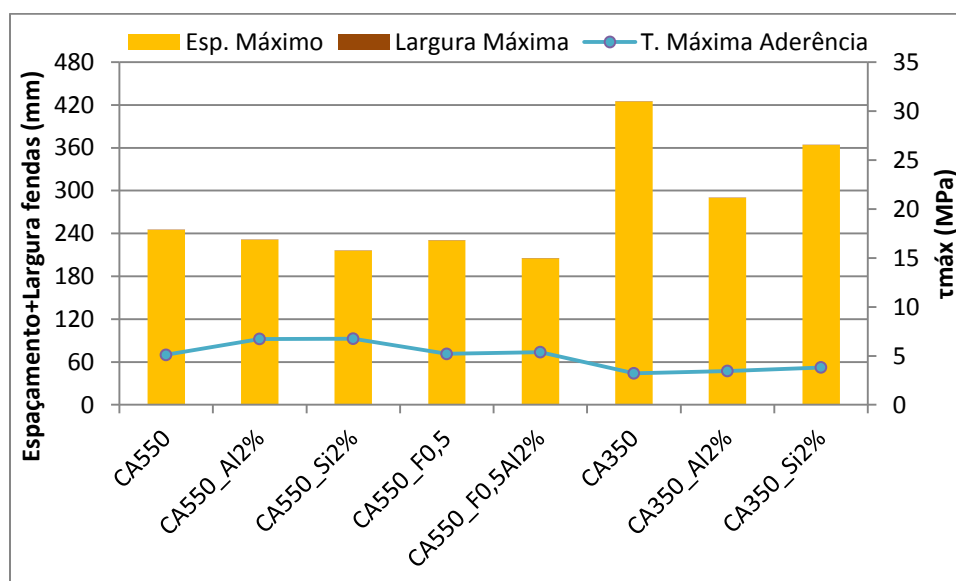


Figura 5.51. Comparação de resultados entre os dois ensaios para varões lisos.

Nos varões nervurados o cenário altera-se um pouco, com as misturas CA\_550 e CA\_550Al2% a apresentarem resultados mais equilibrados nos dois ensaios. O uso de alumínio na classe CA550, apresenta uma tensão de aderência alta e um espaçamento entre fendas baixo. Apesar de as misturas CA\_550Si2% e CA\_550F0,5 apresentarem as tensões de aderência mais altas, aqui na análise conjunta estas duas misturas perdem valorização por apresentarem elevados espaçamentos entre fendas.



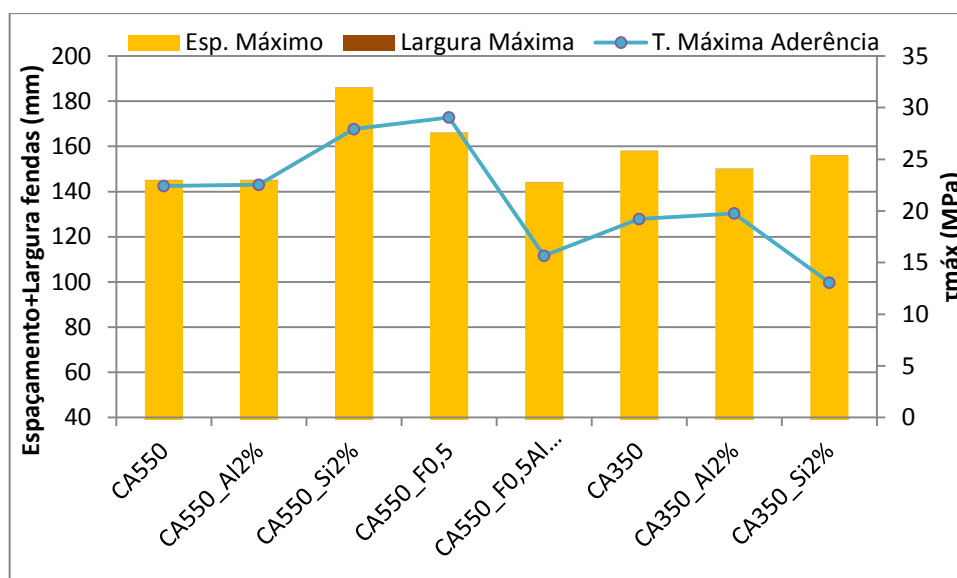


Figura 5.52. Comparação de resultados entre os dois ensaios para varões nervurados.

## 5.4 Cálculos teóricos

Com base nas expressões apresentadas no subcapítulo 3.9.2, relativas às previsões teóricas quanto à: i) largura das fendas, ii) tensão de aderência e iii) contribuição do betão entre fendas, procedeu-se ao cálculo teórico destas variáveis. Note-se que apenas foram feitas comparação com o EC2, embora ainda não esteja legalmente em vigor em Portugal, mas com certeza num futuro próximo passará a ser a referência máxima para o cálculo de estruturas de betão. Para os provetes com fibras metálicas incorporadas, e uma vez que o EC2 não é explícito quanto a este assunto, os cálculos das previsões da largura de fendas e espaçamento entre fendas basearam-se na recomendação RILEM TC 162-TDF, de acordo com as seguintes expressões:

$$W_k = \beta S_{rm} \varepsilon_{sm} \quad (5.3)$$

onde:

$W_k$  - largura da fenda;

$S_{rm}$  - espaçamento entre fendas;

$\varepsilon_{sm}$  - extensão média do aço;

$\beta$  - coeficiente relativo à largura média da fenda:

=1,7 para secções maiores que 800 mm;

=1,3 para secções menores que 300 mm.

$$\varepsilon_{sm} = \frac{\sigma_s}{E_s} \left[ 1 - \beta_1 \beta_2 \left( \frac{\sigma_{sr}}{\sigma_s} \right)^2 \right] \quad (5.4)$$

onde:

$\sigma_s$  - tensão nas armaduras de tração, calculada na hipótese de secção fendilhada;

$\sigma_{sr}$  - tensão nas armaduras de tração, calculada na hipótese de secção fendilhada sujeita às condições de carregamento que provocam o início da fendilhação;

$\beta_1$  - coeficiente que tem em conta o tipo de varão:

=1,0 para varões nervurados;

=0,5 para varões lisos;

$\beta_2$  - coeficiente que tem em conta a duração do carregamento:

=1,0 para cargas de curta duração;

= 0,5 para cargas de longa duração.

$$S_{rm} = \left( 50 + 0,25 K_1 K_2 \frac{\phi_b}{\rho_r} \right) \left( \frac{50}{L/\phi} \right) \quad (5.5)$$

onde:

$\phi_b$  - diâmetro do varão;

$K_1$  - coeficiente que tem em conta o tipo de varão:

=0,8 para varões nervurados;

1,6 para varões lisos;

$K_2$  - coeficiente que tem em conta a distribuição das extensões:

=0,5 para flexão;

=1,0 para tração pura;

$\rho_r$  - taxa de armadura, através do rácio ( $A_s/A_c$ );

$L$  - comprimento das fibras;

$\phi$  - diâmetro das fibras.

Para os cálculos teóricos através do EC2 usaram-se as seguintes variáveis de inserção nas expressões:  $K_1 = 0,8$  nos varões nervurados e  $K_1 = 1,6$  nos varões lisos;  $K_2 = 1,0$ ;  $K_3 = 3,4$ ;

$K_4=0,425$ ;  $c=0,0325$  m;  $\phi=0,01$  m;  $E_s=200$  GPa;  $K_t=0,6$ ;  $\rho_{p,eff}=0,013956$  (As/Ac); os valores de  $f_{ctm}$  e  $E_{cm}$  são os referidos no subcapítulo 4.8 desta dissertação.

O uso das expressões do RILEM TC 162-TDF, foram feitas tendo em conta as variáveis:  $\beta=1,3$ ;  $\sigma_{sr}=142,85$  MPa para a mistura 550F0,5 e  $\sigma_{sr}=157,68$  MPa para a mistura 550F0,5Al25; os valores de  $\sigma_{sr}$  foram calculados tendo em conta a relação  $0,45 \cdot f_{rm1}$  (valor obtido no ensaio de tensão de flexão residual) com a secção transversal do tirante e a área de aço;  $\beta_1=1,0$  nos varões nervurados e  $\beta_1=0,5$  nos varões lisos;  $\beta_2=1,0$ ;  $\phi_b=0,01$  m;  $K_1=0,8$  para varões nervurados e  $K_1=1,6$  para varões lisos;  $K_2=1,0$ ;  $\rho_r=0,013956$ ;  $L=0,03$  m;  $\phi=0,00062$  m.

Nos Quadros 5.9 e 5.10, apresenta-se a comparação entre os resultados experimentais com os teóricos, relativos à largura e espaçamento de fendas. Decidiu-se fazer o cálculo para tensões no aço próximas de 300 MPa, exceto duas misturas da classe CA350 nos varões lisos, no qual não existia informação próxima desta tensão. Nestes casos, optou-se então por realizar os cálculos para outro nível de tensão, o mais próximo dos 300 MPa mas onde nos ensaios tinha sido registado toda a informação necessária.

Quadro 5.9. Comparação resultados experimentais com os teóricos para varões lisos.

Provetes	$\sigma_s$ (MPa)	Valores Teóricos		Valores Experimentais	
		$W_k$ (mm)	$S_{m\acute{a}x}$ (m)	$W_k$ (mm)	$S_{m\acute{a}x}$ (m)
T1L_550	305,6	0,55	0,598	0,25	0,245
T2L_550Al2%	306,9	0,55	0,598	0,20	0,231
T3L_550Si2%	324,7	0,58	0,598	0,28	0,216
T4L_550F0,5	322,1	0,66	0,348	0,18	0,230
T5L_550F0,5Al2%	300,5	0,38	0,348	0,15	0,205
T6L_350	494,0	0,89	0,598	1,18	0,425
T7L_350Al2%	276,3	0,50	0,598	0,40	0,290
T8L_350Si2%	497,8	0,93	0,598	0,50	0,364

Quadro 5.10. Comparação resultados experimentais com os teóricos para varões nervurados.

Provetes	$\sigma_s$ (MPa)	Valores Teóricos		Valores Experimentais	
		$W_k$ (mm)	$S_{m\acute{a}x}$ (m)	$W_k$ (mm)	$S_{m\acute{a}x}$ (m)
T1N_550	313,2	0,33	0,354	0,20	0,145
T2N_550Al2%	301,8	0,32	0,354	0,25	0,145
T3N_550Si2%	294,1	0,31	0,354	0,50	0,186
T4N_550F0,5	313,2	0,32	0,199	0,20	0,166
T5N_550F0,5Al2%	299,2	0,28	0,199	0,18	0,144

T6N_350	271,2	0,29	0,354	0,28	0,158
T7N_350Al2%	318,3	0,34	0,354	0,35	0,150
T8N_350Si2%	318,3	0,34	0,354	0,30	0,156

No Quadro 5.9 verifica-se que os resultados experimentais, largura e espaçamento de fendas, foram menores que os cálculos teóricos, o que significa que os resultados experimentais obtidos estão dentro dos limites regulamentares. Com exceção do provete T6L\_350, que obteve experimentalmente um resultado muito superior ao previsto.

Nos varões nervurados, os resultados não seguiram a mesma tendência, uma vez que os provetes T3N\_550Si2%, T4N\_550F0,5 e T7N\_350Al2% apresentaram valores experimentais superiores aos teóricos, relativo à largura de fendas. Ao nível do espaçamento de fendas, todos os resultados experimentais foram inferiores aos teóricos, significando que as previsões são seguras e conservadores relativamente a este parâmetro.

A expressão do EC2 apresentada no subcapítulo 3.9, para o cálculo da tensão de rotura da aderência, para os varões lisos necessita de um ajuste. Assim sendo, apenas para os varões lisos o cálculo da tensão de aderência dá-se por:

$$f_{bd} = \frac{0,36\sqrt{f_{ck}}}{1,5} \quad (5.6)$$

Os valores de  $f_{ck}$  resultam da expressão  $f_{cm,cil}$ -8 segundo o EC2. Posto isto, no Quadro 5.11 apresentam-se para todas as misturas esta conversão.

Quadro 5.11. Valores de  $f_{ck}$ .

Misturas	$f_{cm,cil}$ (MPa)	$f_{ck}$ (MPa)
550	59,3	51,3
550Al2%	58,2	50,2
550Si2%	59,3	51,3
550F0,5	63,2	55,2
550F0,5Al2%	62,8	54,8
350	32,1	24,1
350Al2%	32,1	24,1
350Si2%	34,6	26,6

No Quadro 5.12 apresentam-se os valores de cálculo relativos à tensão de aderência para os varões lisos e a comparação com os valores experimentais.

Quadro 5.12. Comparação dos resultados experimentais com os teóricos para varões lisos da tensão de aderência.

Provetes	Valores Teóricos (MPa)	Valores Experimentais (MPa)
T1L_550	1,7	5,1
T2L_550Al2%	1,7	6,7
T3L_550Si2%	1,7	6,8
T4N_550F0,5	1,8	5,2
T5L_550F0,5Al2%	1,8	5,4
T6L_350	1,2	3,2
T7L_350Al2%	1,2	3,5
T8L_350Si2%	1,2	3,8

Para calcular as tensões de aderência teóricas para os varões nervurados, segundo a expressão 3.9, tornou-se necessário determinar os valores de  $f_{ctd}$ . Segundo o EC2 este valor determina-se através do quociente  $f_{ct0,05}/1,5$ . Assim, tendo como base os valores determinados nos ensaios de caracterização do betão endurecido,  $f_{ctm}$ , os valores de  $f_{ctd}$  são apresentados:

Quadro 5.13. Valores de  $f_{ctd}$ .

Misturas	$f_{ctm}$ (MPa)	$f_{ct0,05}$ (MPa)	$f_{ctd}$ (MPa)
550	5,7	3,9	2,7
550Al2%	6,9	4,8	3,2
550Si2%	7,2	5,0	3,4
550F0,5	5,3	3,7	2,5
550F0,5Al2%	5,4	3,8	2,5
350	4,8	3,4	2,2
350Al2%	4,5	3,2	2,1
350Si2%	4,1	2,9	1,9

As restantes variáveis necessárias para o cálculo da tensão de aderência, tomam os valores de:  $\eta_1=1,0$  e  $\eta_2=1,0$ .

Quadro 5.14. Comparação dos resultados experimentais com os teóricos para varões nervurados da tensão de aderência.

Provetes	Valores Teóricos (MPa)	Valores Experimentais (MPa)
T1N_550	6,0	22,4
T2N_550Al2%	7,2	22,5
T3N_550Si2%	7,6	27,9
T4N_550F0,5	5,6	29,1
T5N_550F0,5Al2%	5,7	15,7
T6N_350	5,0	19,2
T7N_350Al2%	4,7	19,8
T8N_350Si2%	4,3	13,1

Em todos os resultados obtidos experimentalmente obtiveram-se resultados muito superiores aos previstos pelo EC2 de tensão máxima de aderência, deixando concluir que as previsões do regulamento são bastantes conservadoras relativamente ao que acontece na realidade.

Na última análise, procedeu-se ao cálculo do coeficiente de distribuição,  $\zeta$ , que tem em conta a contribuição do betão tracionado entre fendas e comparou-se com os resultados obtidos experimentalmente. Os valores experimentais da contribuição do betão entre fendas foram obtidos com base na análise da curva força-deslocamento de cada provete. A Figura 5.52 apresenta um exemplo de gráfico força-deslocamento dos tirantes, pelo qual se retiraram os valores da contribuição do betão.

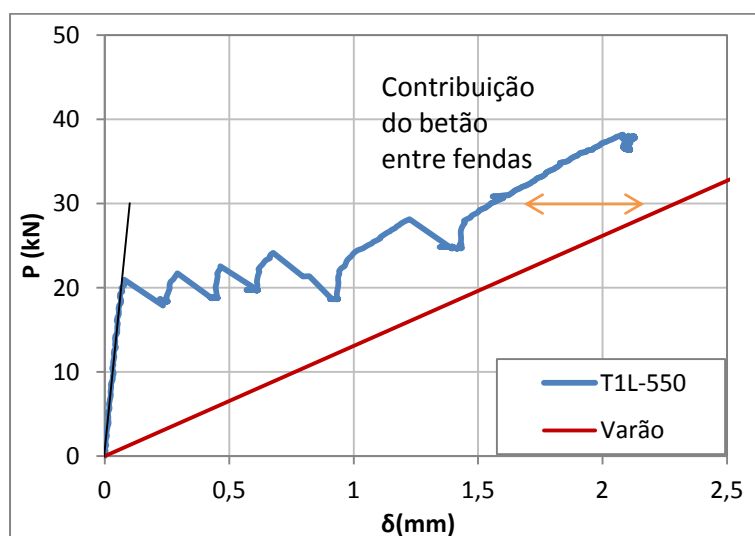


Figura 5.53. Contribuição do betão entre fendas, exemplo de gráfico força-deslocamento, provete T1L\_550.

Perante esta análise, a comparação entre os resultados teóricos e experimentais torna-se possível, como mostram, os Quadros 5.13 e 5.14. Aqui, adotou-se o uso de tensão nas armaduras de tração, na secção fendilhada de análise,  $\sigma_s$ , para uma força de 35 kN por ser um valor comum e existente na maioria dos tirantes obtidos experimentalmente após a

estabilização da abertura de fendas, para assim ser possível fazer uma justa análise comparativa. Como os betões em estudo apresentaram valores de resistência à tração,  $f_{ctm}$ , bastante elevados, como consequência direta disto, os valores calculados da tensão na armadura de tração quando sujeita a condições de carregamento que provocam o início da fendilhação,  $\sigma_{sr}$ , apresentaram também valores bastante elevados. Assim, optou-se para os provetes 550Al2% e 550Si2%, tanto para varões lisos como para nervurados, uma força para comparação de 41 kN. Ainda a salientar que para o provete T3L\_550Si2% não foi possível obter o valor experimental da contribuição do betão.

Os valores de  $\sigma_{sr}$  foram obtidos tendo em conta os valores do  $f_{ctm}$  de cada tirante relacionados com a área da secção transversal do tirante e a área de aço. A variável  $\beta$  tomou o valor de 1 para todos os cálculos.

Quadro 5.15. Comparação dos resultados experimentais com os teóricos para varões lisos, do contributo do betão entre fendas.

Tirante	$\sigma_s$ (MPa)	$\sigma_{sr}$ (MPa)	$\zeta$	$\zeta$ experimental
T1L_550	445,6	408,2	0,16	0,80
T2L_550Al2%	522,03	494,2	0,10	0,84
T3L_550Si2%	522,03	515,7	0,02	-----
T4L_550F0,5	445,6	379,6	0,27	1,12
T5L_550F0,5Al2%	445,6	386,7	0,25	1,10
T6L_350	445,6	343,8	0,40	1,02
T7L_350Al2%	445,6	322,3	0,48	0,86
T8L_350Si2%	445,6	293,6	0,57	1,03

Quadro 5.16. Comparação resultados experimentais com os teóricos para varões nervurados, do contributo do betão entre fendas.

Tirante	$\sigma_s$ (MPa)	$\sigma_{sr}$ (MPa)	$\zeta$	$\zeta$ experimental
T1N_550	445,6	408,2	0,16	0,18
T2N_550Al2%	522,03	494,2	0,10	0,60
T3N_550Si2%	522,03	515,7	0,02	0,12
T4N_550F0,5	445,6	379,6	0,27	0,69
T5N_550F0,5Al2%	445,6	386,7	0,25	0,54
T6N_350	445,6	343,8	0,40	0,41
T7N_350Al2%	445,6	322,3	0,48	0,54
T8N_350Si2%	445,6	293,6	0,57	0,41

Quanto maior for o coeficiente de distribuição,  $\zeta$ , menor será o contributo do betão entre fendas na deformação final do tirante. A análise comparativa demonstra que em alguns provetes o contributo do betão entre fendas superou os resultados teóricos. Apenas os

provetes T7L\_350Al2% e T2N\_550Al2% apresentaram valores do coeficiente de distribuição experimental menores que as respectivas referências, concluindo-se assim que nestes tirantes o betão teve uma maior contribuição entre fendas. O uso de nanopartículas não revelou de forma clara a existência de ganhos relativamente à contribuição do betão entre fendas.



## 6. CONCLUSÕES

O estudo da presente dissertação, teve com objetivo a análise da influência de nanopartículas e fibras metálicas quando inseridas no betão. Depois de terminado todo o processo de análise de resultados foi possível chegar às seguintes conclusões:

- Através da análise da relação  $F - \delta$ , dos dois tipos de varões, é possível verificar que para o caso dos varões lisos, o uso das nanopartículas, nano-SiO<sub>2</sub> e nano- Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, no betão de classe CA550, mostrou ter resultados positivos, sendo estes os provetes que tiveram maior capacidade aderência. No caso dos varões nervurados a maior capacidade de aderência foi obtida no provete com incorporação de fibras metálicas (sem uso de nanopartículas em conjunto) também da classe CA550. Como esperado os provetes com betão CA550 obtiveram os melhores resultados.
- Com base na série de ensaios com varões lisos, concluiu-se, para a largura das fendas, que o uso de nanopartículas de alumínio foi vantajoso, com um ganho na diminuição da largura das fendas de 13,2% para a classe de betão CA550. Por outro lado, na classe CA350, o ganho recaiu sobre a nanopartícula de sílica com um ganho de 57,7%.
- Nos varões nervurados os resultados tornam-se um pouco diferentes do ponto anterior, sendo os melhores resultados da classe CA550 sobre os provetes com fibras metálicas+alumínio incorporadas, com ganhos de 7%, na diminuição da largura de fendas. De forma inesperada, na classe CA350, o uso de nanopartículas não apresentou qualquer tipo de benefício, havendo um aumento da largura de fendas de 16,3% para a nano-sílica e de 35% para a nano-alumínio em relação à referência;
- A análise do espaçamento entre fendas de cada provete mostrou que, como esperado, o uso de varões lisos conduziu a espaçamentos muito mais elevados do que os varões nervurados;
- As nanopartículas apresentaram melhorias quanto ao espaçamento entre fendas, relativamente ao provete de referência, em ambas as classes de betão para o caso de varões lisos. O espaçamento entre fendas nos tirantes com betões da classe CA350 reduziu. O ganho na diminuição do espaçamento entre fendas prendem-se num intervalo de benefício na ordem dos 14% até 32%, sendo o tirante com alumínio aquele que teve melhor resultado. De forma contrária a outra classe de betão, demonstrou ter um melhor benefício quando continha nano-sílica, houve uma redução do espaçamento de 12%. Apesar disto, o melhor resultado de toda a classe CA550 recaiu para o uso de fibras metálicas+alumínio, o qual obteve um resultado positivo de 16%;
- A mistura de referência da classe CA550, nos varões nervurados, apenas foi ultrapassada no sentido positivo, isto é apresentando um valor de espaçamento máximo menor pela mistura de fibras+alumínio, com mero um ganho de 1%. O uso de nanopartículas, particularmente a nano-sílica, demonstrou ser desastrosa, ao contrário do esperado, com resultados negativos de 28%. Na classe CA350, a mistura de

- referência foi ultrapassada pelas nanopartículas de forma positiva, embora com resultados não muito explícitos, cerca de 5% para alumínio e de 1% para a sílica;
- Na análise da largura de fendas, os resultados experimentais foram inferiores às previsões teóricas, exceto nos tirantes T6L\_350, T3N\_550Si2%, T4N\_550F0,5 e T7N\_350Al2%, onde houve um aumento de 33%, 61%, 53% e 2%, respetivamente, no tamanho da largura fendas relativamente aos resultados teóricos;
  - Os valores do espaçamento máximo entre fendas experimental foram todos mais baixos que os teóricos,
  - A análise dos valores teóricos relativos à tensão de aderência e ao coeficiente de distribuição, demonstraram obter valores sempre menores relativamente aos resultados obtidos experimentalmente;
  - No geral o uso de nanopartículas ficou longe do esperado, obtiveram-se algumas melhorias ao nível da aderência e ao nível do padrão de fendilhação embora não sejam muito relevantes. Pode-se concluir, tendo em conta também resultados apresentados na dissertação Silva (2015), no âmbito do estudo do esforço transversal em vigas e que usou as mesmas misturas de betão do presente trabalho, que a justificação para os resultados não serem tão positivos como inicialmente se antecipava, está associada ao tipo nanopartículas usado;
  - Os resultados não demonstraram uma linearidade relativamente aos ganhos obtidos com o uso de nanopartículas. Os resultados são pouco conclusivos, podendo este facto estar relacionado com o pequeno número de amostras que foram feitos em cada tipo de mistura.

## 6.1 Trabalhos Futuros

Finalizadas toda a exposição e análise deste trabalho, é esperançoso que a investigação envolvendo nanopartículas não termine aqui. O potencial dos benefícios que este material pode trazer para a evolução tecnológica da construção está bem presente, desde que sejam feitos ajustes e novas descobertas. Assim, é possível enumerar alguns trabalhos futuros que podem ser feitos na tentativa de esclarecer e/ou solucionar esses problemas:

- Estudo de betões com novas nanopartículas, podendo ser utilizadas de forma isolada ou até mesmo combinadas;
- Estudo da influência da incorporação de nanopartículas em tirantes com outros tipo de varões, como por exemplo varões de fibra de vidro;
- Realizar mais ensaios *Pull Out* e de tração em tirantes com as mesmas nanopartículas usadas no presente trabalho, para se obter uma maior certeza nos resultados e assim identificar uma tendência clara quanto ao benefício da incorporação das nanopartículas no betão.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Concrete Institute (1997). *Fiber Reinforced Concrete*. ACI 544.

American Concrete Institute (1997). *Cracking of Concrete Members in Direct Tension*. ACI 224.2R-92.

Andrea, S., Louro, C. (2011). *Estudo da aderência aço – betão em elementos estruturais de BA*. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Portugal

Marchão, C., Appleton, J., (2007). Apontamentos Betão armado e pré-esforçado I. Apontamentos de apoio às aulas, Departamento Engenharia e arquitectura, Instituto Superior Técnico.

Barros, J. A. O. *Caracterização do comportamento do betão reforçado com fibras de aço por intermédio de ensaios experimentais*. Departamento de Engenharia Civil, Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Guimarães.

Bento, G., (2013). *Tirantes de betão armado com varões de fibra de vidro*. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Portugal

Carmo, R. (2013). *Apontamentos de Betão Estrutural do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra*, Coimbra.

Castro, C. M., El Debs, A. L. (2008). *Concreto de alto desempenho: Estudo da aderência com a armadura sob ações repetidas*. Cadernos de Engenharia de Estruturas, v.10, n 42, p.1-34, São Carlos.

Costa, H. (2007). *Composição e Caracterização Mecânica de Betões Estruturais de Agregados Leves*. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra, Coimbra.

D'Arga, J., Lima, (2004). *Betão Armado- Armaduras, Aspectos gerais*. Portugal.

Du, H., Du, S., Liu, X. (2014). *Durability performances of concrete with nano-silica*. Construction and Building Materials, n 73, p.705-712.

Eligehausen, R., Popov, P. e Bertero, VV. (1983). *Local Bond Stress-slip Relationships of deformed bars under generalized excitations*. Report No UCB/EERC-83/23, Earthquake Engineering Research Center. University of California. California.

Fernandes, N. A. G. (2012). *Caracterização do betão reforçado com fibras de aço*. Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Portugal.

Ferreira, D. F. (2010). *Efeito da fendilhação do betão na distribuição de esforços em pontes mistas*. Tese de Mestrado, Departamento Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Portugal.

- Feynman, R.,. *What is Nanotechnology ?*, [www.nano.gov/nanotech-101/what/definition](http://www.nano.gov/nanotech-101/what/definition). (consultado em Julho de 2015).
- Fontinha, R., Salta, M., (2012). *Materiais nanoestruturados. Desenvolvimento e aplicações nos revestimentos de proteção anticorrosiva*. Jornadas LNEC, Departamento de Materiais, LNEC, Portugal.
- Ghafari, E., Costa, H., Júlio, E., Portugal, A., Durães, L., (2014). *The effect of nanosilica addition on flowability, strength and transport properties of ultra high performance concrete*. Materials and Design, n 59, p.1-9.
- Ghafari, E., Costa, H. Júlio, E., (2014). *RSM-based model to predict the performance of self-compacting UHPC reinforced with hybrid steel micro-fibers*. Construction and Building Materials, n 66, p.375-383.
- Hadi, M. N. S. (2008). *Bond of High Strength Concrete With High Strength Reinforcing Steel*. The Open Civil Enigeering Journal, 2, p.143-147, Australia.
- Heikal, M., Aleem, S.,A.,E., Morsi, W., M., (2013). *Characteristics of blended cements containing nano-silica*. HBRC Journal, n 9, p.243-255.
- Hjorth, O., (1976). *Ein Beitrag zur frage der Festigkeiten und des Verbundverhalte von Stahl und beton bei hohen Beanspruchungsgeschwindigkeiten*. Tese Doutoramento, Techn. Univ. Of Brunswick, Brunswick, Alemanha.
- Li, H., Xiao, H., Guan, X., Wang, Z., Yu, L., (2013). *Chloride diffusion in concrete containing nano-TiO<sub>2</sub> under coupled effect of scouring*. Composites: Part B, n 56, p.698-704.
- Li, H., Xiao, H., Yuan, J., Ou, J., (2003). *Microstucture of cement mortar wiht nano-particles*. Composites : Part B, n 35, p.185-189.
- Lourenço, C., Soldado, E., Costa, H., Carmo, R., Júlio, E., (2015). *Influência da adição de nano-partículas na reologia e no desempenho de betão auto-compactável*. IV Congresso Ibero-americano sobre Betão Auto-compactável, FEUP, Portugal.
- Lourenço, J. (2007). *Apontamentos de Materiais de Construção II do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra*. Coimbra.
- Louro, A. S. (2014). *Caracterização da aderência de varões nervurados sujeitos a ações repetidas e alternadas*. Tese de Doutoramento, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Portugal.
- Model Code 90 (1990). *Model Code for Concrete Structures*. CEB-FIP Comité Euro-International du Béton – Fédération Internationale de la Précontrainte.
- Nazari, A., Riahi, S., Riahi, S., Shamekhi, S., F., Khandemno. (2010). *A. Influence of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles on the compressive strength and workability of blended concrete*. Journal of American Science, n 6, p. 6-9.

- Nazari, A., Riahi, S., Shamekhi, S., F., Khademno, A. (2010). *The effects of incorporation  $Fe_2O_3$  nanoparticles on tensile and flexural strength of concrete*. Journal of American Science, n 6, p.90-93.
- Nazari A., Riahi, S. (2011). *The effects of  $ZnO_2$  nanoparticles on strength assessments and water permeability of concrete in different curing media*. Materials Research, n 14, p.178-188.
- Nunes, A. (2011). *As mais recentes inovações na aplicação do betão estrutural*. 1ª Jornadas de Materiais na Construção, Portugal.
- EN 10080 (2005). *Steel for the reinforcement of concrete — Weldable reinforcing steel—General*. BSI British Standard and the European Standard.
- NP EN 12390 (2009). *Ensaaios do betão endurecido*. IPQ. Portugal.
- NP EN 1992-1-1 (2010). *Eurocódigo 2 – Projecto de estruturas de betão. Parte 1-1: Regas gerais e regras para edifícios*. IPQ. Portugal.
- NP EN 206-1 (2007). *Betão. Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade*. IPQ, Portugal.
- Parker, J., (1796). *A certain Cement or Terras to be used in Aquatic and other Buildings and Stucco Work*. Inglaterra.
- Pereira, H. F.S.G. (2014). *Modelação numérica do comportamento de aderência em estruturas de betão armado*. Tese de Mestrado, Escola de Ciência e Tecnologia, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Portugal.
- Rashad, A. M.(2013). *Effects of  $ZnO_2$ ,  $ZrO_2$ ,  $Cu_2O_3$ ,  $CuO$ ,  $CaCo_3$ , SF, FA, cement and geothermal sílica waste nanoparticles on properties of cementitious materials – A short guide for Civil Engineer*. Construction and Building Materials, n 48, p.1120-1133, Egypt.
- RILEM TC 162-TDF, (2003). *Test and design methods for steel fibre reinforced concrete*. Materials and Structures, vol.36, p.560-567.
- Salemi, N., Behfarnia, K., (2013). *Effect of nano-particles on durability of fiber-reinforced concrete pavement*. Construction and Building Materials, n 48, p.934-941.
- Santana, I. V. (2014). *Estudo da influência das fibras metálicas no comportamento da aderência entre barras de aço e concretos de diferentes classes de resistência*. Dissertação, Escola de Engenharia de São Paulo, Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Silva, J.,V., (2015). *Comportamento ao corte e à flexão de vigas com betões incorporando nanopartículas*. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Portugal.

- Smart Inovation, (2014). *Nanobetão – Os contributos da nanotecnologia para a melhoria do desempenho do betão*. Portugal.
- Soldado, E., Lourenço, C., Costa, H., Carmo, R., Júlio, E., (2015). *Influência da adição de nano-partículas no desempenho da matriz do betão*. 5ª Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas, Portugal.
- Tassios, T.P. (1979). *Properties of bond between concrete and steel under load cycles idealizing seismic actions*. CEB- Bulletin d'Information N°131, Vol. 1, Roma, Itália.
- Torgal, F., P., Jalali, S. (2011). *Betão Eco-Eficiente: O futuro da indústria do betão pronto*. Betão, N°26, Associação Portuguesa das Empresas de Betão Pronto (APEB), Portugal.
- Torgal, F., P., (2012). *Utilização de Nanopartículas no desenvolvimento de betões de elevado desempenho*. Maquinaria, Edição nº 225.
- Ulrix, E., Ferreira, N., (2011). *State of the art – Betões com fibras em aplicações subterrâneas*. 1ª Jornadas de Materiais na Construção, Portugal.
- Vicat, L., J., (1818). *Recherches expérimentales sur les chaux de construction. Les bétons et les mortiers ordinaires*. França.
- Vieira, O. F. (2011). *A consideração de deformações impostas no projecto de tanques*. Tese de Mestrado, Departamento Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Portugal.
- Vitt, G., (2011). *Understanding Steel Fibre Reinforced Concrete*. Dramix.
- Yu, R., Tang, P., Spiesz, P., Brouwers, H.J.H., (2014). *A study of multiple effects of nano-silica and hybrid fibres on the properties of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC) incorporating waste bottom ash (WBA)*. Construction and Building Materials, n 60, p.98-110.